

## OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS EM ESTALEIROS NACIONAIS CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE CONTEÚDO LOCAL

Raphael Ambrico Fagundes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Orientadores: Laura Silvia Bahiense da Silva  
Leite  
Edilson Fernandes de Arruda

Rio de Janeiro  
Abril de 2017

OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS EM ESTALEIROS  
NACIONAIS CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE CONTEÚDO LOCAL

Raphael Ambrico Fagundes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Examinada por:

---

Prof.<sup>a</sup>. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

---

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

---

Dr. Paulo Cesar Ribas. D.Sc.

---

Dr. Yuri Gama Lopes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2017

Fagundes, Raphael Ambrico

Otimização e simulação da programação de projetos em estaleiros nacionais considerando restrições de conteúdo local / Raphael Ambrico Fagundes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

X, 65 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Edilson Fernandes de Arruda

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Produção, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 60-65.

1. Otimização. 2. Simulação. 3. Programação de atividades em estaleiros nacionais. I. Leite, Laura Silvia Bahiense da Silva *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico essa dissertação aos meus avós Ângela Langone Ambrico e Giovanni Ambrico (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Marisa Ambrico Fagundes e Francisco de Assis Fagundes, por me proporcionarem todas as condições e me incentivarem a estudar. Se hoje cheguei até aqui, foi graças a eles. Agradeço também à minha irmã Isabela Ambrico Fagundes pelo apoio e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço aos meus orientadores Laura Silvia Bahiense Leite e Edilson Fernandes de Arruda pela orientação e ajuda durante o mestrado. Agradeço também aos demais componentes da banca Paulo Cesar Ribas e Yuri Gama Lopes pelas contribuições. Agradeço também as colaborações dos professores Virgílio José Martins Ferreira Filho (COPPE/UFRJ) e Fabrício Oliveira (PUC-Rio) durante o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos meus professores da graduação do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos – *campus* Sorocaba pelo incentivo a continuar estudando e iniciar um projeto de mestrado. Agradeço, em especial, aos professores Eli Ângela Vitor Toso, Juliana Veiga Mendes e João Eduardo A. R. da Silva por toda a colaboração durante a minha formação.

Agradeço também ao professor Rodrigo Arnaldo Scarpel, do departamento de Engenharia Mecânica e Aeronáutica, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – meu primeiro orientador de mestrado, que tive que abandonar, por questões profissionais.

Agradeço aos meus chefes Carlos Alberto Rechelo Neto e Leonardo de Oliveira M. Moraes que, durante o período do mestrado, me incentivaram a estudar e me deram todas as condições para que esse projeto fosse concluído.

Agradeço aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da URFJ, que estiveram nessa jornada comigo: Daniela Chagas, Karina Lyra, Cecília Lorenzo e Renato Pescarini Valério.

Agradeço aos colegas de trabalho, que de alguma forma me ajudaram e colaboraram para que eu concluísse este trabalho: Diego Silveira Maciel, Tiago Said Cruz, Sérgio Vitor B. Bruno, Lucas Pierezan Magalhães, Rafael Florêncio Costa, Paula Maurício Nunes, Marcelo Amaral, Rafael Marinho Barcellos, Vinícius Prado, Luiz Carlos Ferreira Sousa, Marcos Fabrício Sampaio Gomes, Tatiana Escovedo, Victor Anselmo Silva, Daniel Barry Fuller.

Por fim, e não menos importante, agradeço aos amigos: Guto Alexandre de Sá, Fábio Roque, Rodrigo Castellari Gonzalez, Álvaro Monteiro, Eduardo Xavier, Marcelo da Silva Costa, Marcela Cambraia Marin, Ana Carolina Santos, Damilla Harumi B. Osiro, Bruno Leonardo Hoshino, Eliel M. Costa Junior e Marci Cres. Agradeço a eles pela compreensão durante os períodos de ausência em função do mestrado, pelo carinho e pela presença, mesmo que fisicamente distantes. Agradeço, em especial, ao Alexandre Ressurreição, por todo o apoio dado durante o período final do mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS EM  
ESTALEIROS NACIONAIS CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE CONTEÚDO  
LOCAL

Raphael Ambrico Fagundes

Abril/2017

Orientadores: Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Edilson Fernandes de Arruda

Programa: Engenharia de Produção

Com o crescimento das atividades de exploração e produção de óleo e gás no país, principalmente com a descoberta das reservas de petróleo na camada do Pré-sal, houve aumento na demanda por construção de navios, sondas e plataformas. Nesse contexto, o planejamento e programação de atividades nos estaleiros nacionais tornou-se uma tarefa desafiadora, visando minimizar a exposição a multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional e, ao mesmo tempo, atender a demanda da indústria petrolífera nacional. Para apoiar o processo decisório de alocação de projetos a estaleiros e dimensionamento da exposição ao conteúdo estrangeiro, foi proposto um modelo de programação inteira mista, baseado no problema clássico de programação de projetos com restrição de recursos. Devido aos atrasos históricos na conclusão das atividades pela indústria naval nacional, uma modelagem robusta foi desenvolvida para tratar a antecipação de possíveis atrasos. O parâmetro conhecido como grau de conservadorismo foi dimensionado de acordo com as probabilidades de atrasos das atividades, baseadas nos dados históricos. Por fim, foi proposto um modelo de simulação para análise de sensibilidade e dimensionamento de atrasos na entrega dos projetos, e do custo de oportunidade no atraso na produção de óleo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

## OPTIMIZATION AND SIMULATION OF PROJECT SCHEDULING AT NATIONAL SHIPBUILDINGS CONSIDERING LOCAL CONTENT CONSTRAINTS

Raphael Ambrico Fagundes

April/2017

Advisors: Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Edilson Fernandes Arruda

Department: Industrial Engineering

The growth of oil exploration and production in Brazil, especially after the pre-salt oil reserves discovery, implied in ships, rigs and platforms construction demand increase. In this context, the activities planning and scheduling in Brazilian shipyards has become a challenging task to minimize exposure to fines for local content non-compliance clauses and, at the same time, meet the demand of the national oil industry. In order to support the decision-making process of allocating projects to shipyards and dimensioning the exposure to foreign content, this work proposes a mixed integer programming model, based on the classic resource constrained project scheduling problem. Due to the historical delays in the completion of activities by the national shipbuilding industry, a robust model was developed to address the anticipation of possible delays. The parameter known as degree of conservatism was scaled according to the activities lateness probabilities, based on the historical data. Finally, an event discrete simulation model is proposed for sensitivity analysis and delays dimensioning in the projects delivery, and the opportunity cost in the oil production delay.



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	3
1.2 ESTRUTURA.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS.....	6
2.2 O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS e INCERTEZAS NA DURAÇÃO DAS ATIVIDADES .....	14
3. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE ATIVIDADES EM ESTALEIROS NACIONAIS COM CLÁUSULAS DE CONTEÚDO NACIONAL MÍNIMO.....	22
4. METODOLOGIA.....	26
5. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	30
5.1 MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	30
5.1.1 Conjuntos básicos.....	30
5.1.2 Parâmetros do modelo.....	31
5.1.3 Variáveis de decisão.....	31
5.1.4 Função objetivo.....	32
5.1.5 Restrições .....	32
5.1.6 Descrição do modelo proposto.....	33
5.2 DEFINIÇÃO DO GRAU DE CONSERVADORISMO .....	35
5.3 MODELO DE SIMULAÇÃO .....	36
5.3.1 Lógica do modelo de simulação.....	37
6. RESULTADOS COMPUTACIONAIS .....	39
6.1 CÁLCULO DO GRAU DE CONSERVADORISMO PARA OTIMIZAÇÃO .....	39
6.2 RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO .....	40
6.3 RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	43
6.4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS CONSOLIDADOS.....	46

6.5 ANÁLISE DE MÉDIO PRAZO .....	51
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	56
REFERÊNCIAS .....	60

## 1. INTRODUÇÃO

A criação de políticas de conteúdo nacional no setor de petróleo e gás no Brasil está diretamente relacionada ao término do monopólio estatal, no final da década de 1990 e início dos anos 2000. As políticas de conteúdo local (PCL) são aquelas que, ao serem aplicadas a uma empresa ou a um conjunto de empresas, dão preferência a fornecedores e à utilização de mão-de-obra e insumos nacionais, em detrimento de importações (NGOASONG, 2014; CNI, 2012; FOSTER *et al.*, 2013).

Tais políticas visam incentivar com que investidores privados, desejosos de atuar no setor de óleo e gás, invistam parte de seus recursos no desenvolvimento da indústria nacional. De acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), desde 1999, quando ocorreu a primeira rodada de licitações de blocos exploratórios de petróleo, foram definidos níveis mínimos de investimento na indústria nacional. Entretanto, nos primeiros contratos, a cláusula de conteúdo local estabelecia apenas que, em condições similares de preço, qualidade e prazo, deveriam ser priorizados os fornecedores nacionais.

Os níveis de conteúdo local médio ofertado nas fases de exploração e desenvolvimento da produção pelas empresas vencedoras das licitações das rodadas 1 a 10 são apresentados na Figura 1.

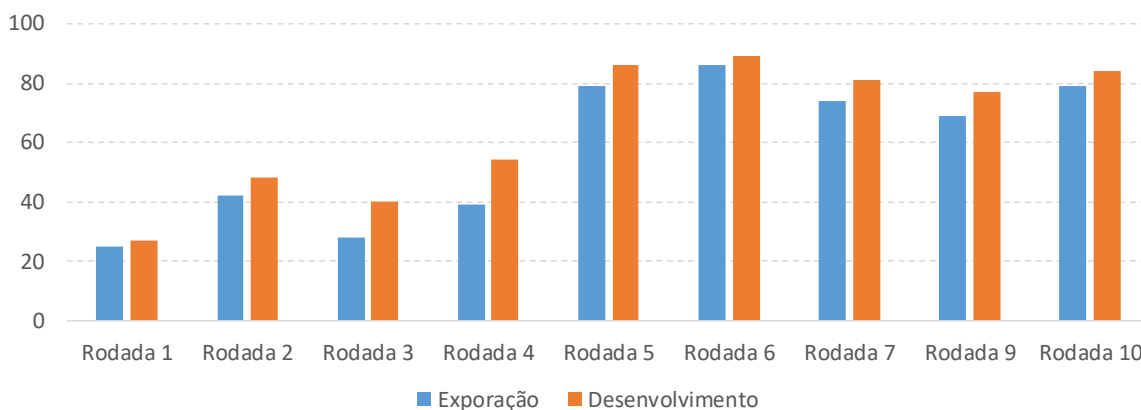


Figura 1 – Conteúdo local médio relativo às etapas de exploração e desenvolvimento da produção das propostas vencedoras (Fonte: Adaptado de CNI, 2012).

Os níveis médios de conteúdo local apresentados na Figura 1, representam todas as atividades e equipamentos utilizados no desenvolvimento da produção, incluindo sondas, plataformas e outros.

Caso uma empresa de exploração e produção de óleo que atua no Brasil não cumpra os requisitos mínimos exigidos de conteúdo nacional, são aplicadas multas. As multas pelo não cumprimento são proporcionais ao percentual não realizado, tendo como base o valor de conteúdo nacional proposto pela empresa. A partir de 2005, a multa passou a ser calculada observando o seguinte critério (CNI, 2012):

- se  $PNR < 65\%$ , então  $M = 60\%$  (1.1)

- se  $PNR \geq 65\%$ , então  $M = 114,3\% * PNR - 14,3\%$  (1.2)

Na expressão acima, PNR é o percentual de conteúdo local não realizado, e M é o percentual a ser aplicado sobre o valor do conteúdo local não realizado, para cálculo da multa, que é calculada através da seguinte equação:

$$VM = M * VNR, \quad (1.3)$$

sendo VM o valor da multa, em unidade monetária; M o percentual a ser aplicado, conforme critério apresentado anteriormente; e VNR é o valor, em unidade monetária, do conteúdo local não realizado.

A Figura 2 apresenta a evolução do percentual a ser aplicado (M) sobre o valor do conteúdo local não realizado para cálculo da multa. Se o conteúdo local não cumprido for menor do que 65% do valor proposto de conteúdo local na proposta apresentada, o valor de multa a ser aplicado é de 60% sobre o valor total não realizado. Se o percentual de conteúdo nacional não cumprido for igual ou superior a 65% do valor oferecido, a multa a ser aplicada é crescente, partindo de 60% e atingindo 100% do valor não realizado, no caso de não realização total ( $PNR = 100\%$ ) do conteúdo local.

A multa por não atendimento das exigências de conteúdo nacional pode não ser aplicada no caso de preços ou prazos muito diferentes dos oferecidos pela indústria estrangeira, ou quando se trata de uma nova tecnologia, ainda não desenvolvida no país.

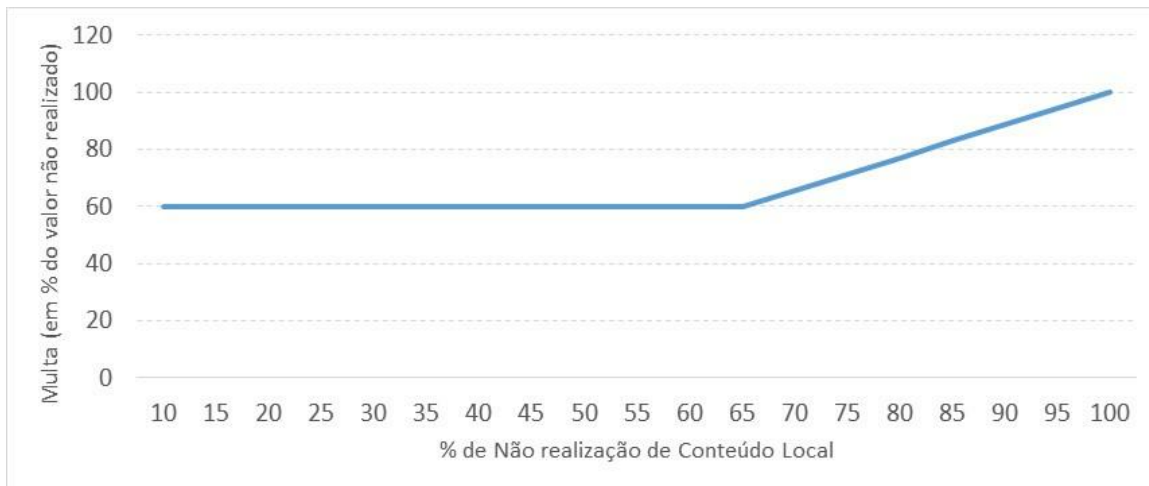


Figura 2 – Evolução do percentual para cálculo da multa de não atendimento de cláusulas de conteúdo local  
(Fonte: CNI, 2012).

Por ter passado por um longo período de estagnação, a indústria naval brasileira pode não ser capaz de atender a demanda crescente do setor de óleo e gás no Brasil, principalmente devido aos investimentos que vêm sendo realizados na área, ocasionados, especialmente, pela descoberta das reservas do pré-sal. Ramos e Godim (2015) argumentam que “*houve evolução de produtividade e tecnologia aquém do esperado para a cadeia produtiva de óleo e gás como um todo*”. Além disso, os projetos de construção de sondas e plataformas podem sofrer atrasos na entrega, atrasando, assim, a produção de óleo no país. Esses atrasos são críticos, pois envolvem altos valores de investimento e receita (PRIETO, 2014).

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Dado o contexto apresentado anteriormente, o objetivo principal desta pesquisa é desenvolver um sistema de apoio à decisão, baseado em programação matemática e simulação, para o problema de programação de atividades em estaleiros. Dessa forma, pretende-se buscar melhor utilização dos recursos disponíveis no Brasil, evitando multas por não cumprimento de cláusulas de conteúdo local e atrasos na conclusão dos projetos.

Esse tipo de problema geralmente é modelado com base no problema clássico conhecido na literatura como *Resource-constrained Project Scheduling Problem* – RCPSP (LI & WOMER, 2015; RANJBAR *et al.*, 2013; KYRIAKIDIS *et al.*, 2011), que é pertencente

à classe dos problemas de Otimização Combinatória classificados como NP-difíceis; ou seja, problemas de alta complexidade, em que o esforço computacional exigido cresce de forma exponencial (não polinomial) com o tamanho do problema (GAREY *et al.*, 1976; WOLSEY, 1998). Os modelos mencionados pertencem à área de conhecimento conhecida como Pesquisa Operacional, bastante útil em problemas de gestão e produção. De maneira geral, a Pesquisa Operacional tem contribuído ativamente no desenvolvimento de soluções na área de gerenciamento de projetos, devido à elevada complexidade dos problemas (FULGA, 2016; KONÉ *et al.*, 2011; VASCONCELLOS, 2007).

Os modelos clássicos para o RCPSP geralmente consideram valores determinísticos para a duração das atividades. Entretanto, existe alta incerteza nos dados de duração de atividades e o uso de valores determinísticos pode impactar negativamente no resultado do estudo (CREEMERS *et al.*, 2015; BRUNI *et al.*, 2011; VONDER *et al.*, 2008; VASCONCELLOS, 2007). Dessa forma, propõe-se a consideração de possíveis atrasos na duração das atividades através de uma abordagem robusta, baseada nos resultados de Bertsimas e Sim (2004).

Além disso, como objetivo secundário, propõe-se o desenvolvimento de um modelo de simulação a eventos discretos para avaliar a solução proposta pelo modelo de otimização desenvolvido no presente trabalho.

## 1.2 ESTRUTURA

Apresenta-se, no Capítulo 2, uma revisão da literatura referente ao problema clássico de programação de projetos com restrições de recursos (RCPSP), explorando os principais modelos, algumas aplicações e métodos utilizados para resolução. Além disso, são apresentadas abordagens para considerar incertezas em alguns parâmetros de entrada dos modelos, com destaque maior para os conceitos de otimização robusta e simulação, utilizados nesta dissertação.

O Capítulo 3 traz uma contextualização do problema real através da abordagem por meio do problema de programação de projetos com restrição de recursos, destacando-se as particularidades do caso estudado.

No capítulo 4, por sua vez, é apresentada a metodologia desenvolvida nessa pesquisa.

Em seguida, no Capítulo 5, são apresentados os modelos desenvolvidos: modelo de programação linear inteira mista proposto para resolver o problema estudado, considerando abordagem robusta para possíveis atrasos na realização dos projetos e o modelo de simulação de eventos discretos, para realizar análise de sensibilidade nas soluções ótimas encontradas.

O Capítulo 6 aborda os resultados do estudo e, por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões, considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas subseções posteriores, é apresentada a revisão bibliográfica geral para o problema de programação de projetos com restrição de recursos e abordagens para considerar incertezas neste tipo de problema.

### 2.1 O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS

A constante presença de recursos escassos em gerenciamento de projetos, bem como as relações de precedência de atividades, torna a programação de projetos uma atividade desafiadora. Isso tem atraído atração de pesquisadores e de profissionais da área no desenvolvimento de técnicas matemáticas de apoio à decisão (e.g., KOPANOS *et al.*, 2014; HARTMANN & BRISKORN, 2010; BRUCKER *et al.*, 1999).

Na literatura (e.g., KRETER *et al.*, 2016; KOPANOS *et al.*, 2014; HARTMANN & BRISKORN, 2010), os problemas de programação de atividades de projetos considerando as limitações de recursos são conhecidos como *resource-constrained project scheduling problems* (RCPSP).

Blazewicz *et al.* (1983) e Brucker *et al.* (1999) apresentam o modelo matemático RCPSP clássico, visto como uma extensão do problema de programação de tarefas (*jobs*) – conjunto de uma ou mais operações – em máquinas. Neste tipo de problema, uma atividade é realizada por um recurso e cada recurso pode realizar uma única atividade em um instante de tempo.

A programação de projetos é o sequenciamento de um conjunto de atividades inter-relacionadas, realizadas por um conjunto de recursos, geralmente escassos. Busca-se, em geral, a otimização de um ou mais objetivos (e.g., KONÉ *et al.*, 2011; PARASKEVOPOULOS *et al.*, 2012; FAWZAN & HAOUARI, 2005).

Trata-se de um problema de difícil resolução através de métodos exatos de programação matemática baseados na técnica de *branch-and-bound* (e.g., KOPANOS *et al.*, 2014; RANJBAR *et al.*, 2013; KONÉ *et al.*, 2011), em um tempo computacional razoável, conforme o tamanho da entrada cresce. Por isso, existem poucas aplicações práticas (reais)



de métodos exatos e muitas heurísticas foram desenvolvidas para resolver o RCPSP. Entretanto, pode ser possível, em alguns casos, chegar a soluções ótimas para problemas reais (e.g., ZHENG & WANG, 2015; ABBASI *et al.*, 2006; TSAI & GEMMILL, 1998).

Formalmente, o *resource-constrained project scheduling problem* pertence ao conjunto de problemas de otimização combinatória (PARASKEVOPOULOS *et al.*, 2012; KONÉ *et al.*, 2011), caracterizado por um espaço de soluções discreto que pode ser representado pela  $t$ -upla  $(V, p, E, R, B, b)$ , em que  $V$  é o conjunto de atividades;  $p$  é um vetor de durações;  $E$  é um conjunto de relações de precedência;  $R$  é um conjunto de recursos;  $B$  é um vetor de disponibilidade de recursos e  $b$  é uma matriz de demanda.

Na maioria dos casos, a função objetivo para o RCPSP consiste em minimizar a duração total das tarefas (*makespan*), que equivale ao instante de término da atividade mais tardia (KELLENBRINK & HELBER, 2015; GINZBURG & GONIK, 1998); ou seja, o instante de conclusão do projeto. Outras funções-objetivo, entretanto, podem ser modeladas, de acordo com a aplicação ou problema específico que for estudado (HARTMANN & BRISKORN, 2010).

Alguns autores modelam o RCPSP como uma rede de atividades submetida a uma restrição de recursos através de um grafo acíclico direcionado, onde as atividades são representadas pelos nós e cada arco corresponde a uma relação de precedência entre cada par de atividades (e.g., RANJBAR *et al.*, 2013; BRUNI *et al.*, 2011; HARTMANN & BRISKORN, 2010; GINZBURG *et al.*, 2003).

Existem diferentes abordagens matemáticas para a formulação do RCPSP. Alguns modelos tratam o tempo de forma discreta, com variáveis binárias indexadas por atividade e por período. Essas variáveis indicam se a atividade está sendo feita naquele período ou não. Esse tipo de abordagem apresenta um grande número de variáveis, o que geralmente dificulta a resolução do problema, principalmente quando se trata de programação em um longo horizonte de tempo (e.g., KRETER *et al.*, 2016; KELLENBRIK & HELBER, 2015; KOPANOS *et al.*, 2014; NABER & KOLISCH, 2014; KONÉ *et al.*, 2011).

Outros autores tratam o tempo de forma contínua, onde, a cada par de atividades designa-se uma variável de decisão que indica se uma das atividades é realizada antes da outra. Essa abordagem é mais vantajosa para tratar problemas com maior horizonte de programação, como é o caso da programação de projetos em estaleiros brasileiros, objeto de

estudo desta pesquisa. A desvantagem é que, dependendo da escolha de alguns parâmetros, a relaxação pode trazer resultados ruins, dificultando, dessa forma, a resolução do problema, como relatado em (KOPANOS *et al.*, 2014; ARTIGUES *et al.*, 2013; KONÉ *et al.*, 2011).

Koné *et al.* (2011) e Kopanos *et al.* (2014) comparam as diferentes modelagens baseadas tanto em tempo discreto como em tempo contínuo, à luz de alguns exemplos. Na maioria dos exemplos apresentados, as diferentes modelagens apresentaram desempenhos semelhantes. Em Kopanos *et al.* (2014), especificamente, a modelagem por tempo contínuo apresentou resultados melhores em alguns cenários. Entretanto, os problemas abordados foram de porte pequeno, o que contrasta com o problema de programação de estaleiros brasileiros, que possui maior quantidade de atividades e maior horizonte de tempo.

Hartmann e Briskorn (2010) alegam que os modelos clássicos encontrados na literatura são restritivos para aplicações em problemas práticos. Dessa forma, algumas extensões e adaptações nos modelos-base foram desenvolvidas para aplicá-los em casos reais. Os autores fizeram uma revisão da literatura e apresentaram algumas dessas extensões encontradas nos modelos de RCPSP para as mais diversas aplicações.

As extensões mais comuns encontradas na literatura para o problema clássico de RCPSP são: preferência para alguma(s) atividade(s) (do inglês *preemption*), onde se permite a interrupção de uma atividade para que outra atividade preferencial seja realizada pelo mesmo recurso; a variação da necessidade de recursos por atividade com o tempo, ou seja, no início ou no final da atividade podem ser requisitados mais recursos; diferentes formas para realizar um mesmo projeto, ou seja, uma atividade pode ser realizada com diferentes alocações de recursos e, conseqüentemente, diferentes durações. Neste último tipo de abordagem, o modelo define qual o modo ótimo de realização da atividade, de acordo com a função objetivo proposto (HARTMANN & BRISKORN, 2010).

Além dessas, outras extensões são apresentadas, como: definição de períodos proibidos, nos quais determinadas atividades não podem ser realizadas; duração de atividades contínua, ou seja, o tempo de duração da atividade pode ser um valor fracionário; modelagem de recurso não renovável representando, por exemplo, o orçamento do projeto; além de modelagem de bônus ou custo por atraso ou adiantamento no prazo final de projetos e atividades (e.g., HARTMANN & BRISKORN, 2010).

Os recursos utilizados na execução de atividades de projetos podem ser classificados em recursos renováveis e recursos não renováveis. Os primeiros são aqueles que, após serem alocados e concluir a realização de uma determinada atividade, ficam disponíveis para outra atividade, deste ou de outro projeto. Exemplos de recursos renováveis são máquinas e profissionais. Já os recursos não renováveis são aqueles que são consumidos ao longo do projeto, não estando disponíveis para atividades futuras. Exemplos deste tipo de recurso são combustível e matéria-prima (KONÉ *et al.*, 2012; SILVA & OCHI, 2011).

Há, entretanto, outro tipo de recursos, os recursos dinâmicos. Estes podem ser consumidos ou criados durante a execução de atividades, como, por exemplo, dinheiro. Após a construção de uma expansão em uma fábrica, por exemplo, cujas atividades consumiram recursos, o projeto está apto a gerar novos recursos que podem ser alocados em outras atividades. Exemplos deste tipo de recurso, que são gerados e consumidos ao longo da execução das atividades, são combustível e matéria-prima (KONÉ *et al.*, 2012; SILVA & OCHI, 2011). Para resolver o RCPSP com recursos dinâmicos, Silva e Ochi (2011) utilizaram algoritmos genéticos e algoritmos evolutivos, bem como heurísticas híbridas, combinando os algoritmos com métodos exatos.

Além disso, existem extensões para o RCPSP considerando janela de tempo para realização de atividades, com penalização por violação desses intervalos; uso de turnos para disponibilidade de recursos; e diferentes relações de precedência de atividades e relações de recursos (HARTMANN & BRISKORN, 2010). Na maioria dos casos, são consideradas relações de precedência do tipo término-início, ou seja, uma atividade só pode iniciar quando a sua predecessora terminar. Além da relação término-início, existem, entretanto, relações de precedência do tipo início-término; término-término e início-início (DINSMORE & SILVEIRA, 2013).

Hartmann e Briskorn (2010) apresentam, ainda, extensões na modelagem de recursos, considerando turnos, recursos cumulativos (como estoques, por exemplo), recursos contínuos (como energia e fluidos) e recursos dedicados. Essa última abordagem é bem similar ao problema dos estaleiros, pois cada recurso possui capacidade de processar apenas uma atividade por vez.

Há também extensões para a função objetivo, considerando diferentes indicadores de tempo, como duração (*makespan*), atrasos, desvios, e suas variações. Além disso, a função

objetivo pode ser baseada em custos, em valor presente líquido (VPL) para fluxo de caixa, considerando entradas e saídas financeiras para cada atividade, ou ainda com múltiplos objetivos, considerando custos e tempos. No caso de funções com mais de um objetivo, é importante definir maneiras de se comparar grandezas distintas (HARTMANN & BRISKORN, 2010).

Tanto Abbasi *et al.* (2006) como Fawzan e Haouari (2005) apresentam modelos considerando dois objetivos: minimização de duração e maximização da robustez da programação. A robustez é definida, nos dois artigos, como o tempo que uma atividade pode atrasar sem que haja impacto na duração total do projeto. Para Fawzan e Haouari (2005), robustez é a habilidade de lidar com pequenos acréscimos nos tempos de duração de algumas atividades, que podem ser ocasionados por fatores não controláveis. Quanto maior for a robustez, mais eventos aleatórios podem atrasar as atividades sem que haja impactos significativos na duração e no custo total do projeto. Dessa forma, o desafio é propor uma programação viável que possa ser realizada mesmo com a ocorrência de condições indesejáveis.

Para resolver o RCPSP com dois objetivos, Abbasi *et al.* (2006) utiliza meta-heurística de recozimento simulado (*simulated annealing*), que não apresenta garantia de otimalidade. A abordagem apresentou boas soluções, apesar de ter sido testada apenas em exemplos ilustrativos, com dados mais simples e poucas atividades no projeto. Fawzan e Haouari (2005) também abordam o RCPSP como um problema de otimização combinatória com dois objetivos: minimização da duração e maximização da robustez. A robustez é calculada como o somatório das folgas que não impactam em atraso para o projeto. Para resolver o problema, foi proposto um algoritmo de busca tabu, que foi testado apenas em um problema ilustrativo de pequeno porte.

Existem, ainda, estudos baseados no modelo clássico de RCPSP considerando multimodos, ou seja, atividades que podem ser realizadas de diferentes modos, com diferentes alocações de recursos. Cada recurso possui um custo associado e, dependendo da forma como as atividades do projeto são realizadas, há um dispêndio total diferente. Além disso, a duração das atividades também é, geralmente, função dos recursos alocados para sua realização. Na maioria dos casos, o tempo de processamento de uma atividade pode ser reduzido se ela for realizada por recursos mais poderosos e mais caros. O problema pode ser

modelado com o objetivo de minimizar a duração total do projeto, com uma restrição de orçamento, ou ao contrário, ou seja, com o objetivo de minimizar o custo total considerando uma restrição de prazo de conclusão do projeto. Considerar múltiplos modos de execução de atividades torna o problema mais realista, mas resulta num aumento de variáveis de decisão do modelo, o que pode dificultar a sua resolução (e.g., CHAKRABORTTY *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2015; YAMASHITA & MORABITO, 2007; BRUCKER *et al.*, 1999; BIANCO *et al.*, 1998).

Ferramentas clássicas de otimização combinatória, baseadas no método de *branch and bound* podem ser utilizadas para encontrar a solução ótima de problemas determinísticos de programação de projetos (CHENG *et al.*, 2015; RANJBAR *et al.*, 2013; YAMASHITA & MORABITO, 2007; KLEIN & SCHOLL, 2000). Segundo Brucker *et al.* (1999), a busca em profundidade é melhor para o RCPSP, principalmente por ser mais eficiente em termos de utilização de memória.

Diversos métodos heurísticos são utilizados para resolver problemas baseados no modelo clássico de RCPSP. Alguns tipos de heurística utilizados são: regras de prioridade, geralmente de fácil implementação e demandando baixo esforço computacional; busca tabu; algoritmos genéticos; algoritmos evolutivos; algoritmos multi-agente; e algoritmos híbridos, que combinam heurísticas com algoritmos exatos (ZHENG & WANG, 2015; BESIKCI *et al.*, 2015; BRUCKER *et al.*, 1999; SILVA & OCHI, 2011).

Alguns artigos apresentam aplicações de modelos baseados em RCPSP em problemas práticos reais (e.g., CHENG *et al.*, 2015; HAASE *et al.*, 1998). Cheng *et al.* (2015) apresentam um estudo de caso referente à instalação de novos equipamentos na ampliação de capacidade de uma fábrica. Trata-se, segundo os autores, de um processo complexo que envolve dependência de atividades, disponibilidade de recursos e multimodo, em que se busca um equilíbrio (*trade-off*) entre custo e tempo. Quanto mais rápida a conclusão do projeto, mais breve será a disponibilização de produtos para venda e geração de receitas na fábrica; dessa forma, busca-se a conclusão do projeto no menor tempo possível. O problema foi resolvido através de algoritmo de *branch and bound*.

Já Haase *et al.* (1998) apresentam uma aplicação prática dos modelos de RCPSP para programação de cursos e treinamentos oferecidos pela companhia aérea alemã Lufthansa. São oferecidos 670 tipos de cursos em três centros de treinamento diferentes. O horizonte de

planejamento é de um ano e o objetivo é maximizar o lucro, considerando restrições de recursos e precedência. Para solucionar o problema prático, que antes era solucionado de forma manual em planilhas, Haase *et al.* (1998) propõem uma heurística baseada em algoritmos de prioridades. Na abordagem proposta, cada curso é modelado como um projeto que possui  $n$  tarefas (*jobs*), que representam as lições. Existe uma demanda por cada curso que deve ser atendida. Os cursos são agrupados em blocos que são associados a determinados grupos de instrutores, que possuem habilidades para aquele treinamento. Apesar de não garantir a solução ótima, segundo os autores, o modelo chega a uma boa solução em um tempo computacional consideravelmente menor do que era feito antes na empresa, trazendo ganhos expressivos na programação de treinamentos na Lufthansa.

Assim como as diferentes extensões apresentadas, o modelo proposto neste trabalho se baseou no modelo clássico de tempo contínuo (KONÉ *et al.* 2011; KOPANOS *et al.* 2014) para propor uma abordagem adaptada ao problema de programação de estaleiros nacionais, considerando suas particularidades.

Na literatura, foram encontrados muitos estudos relacionados ao modelo clássico de RCPS. Por se tratar de um problema complexo, poucos estudos abordam aplicações reais, enquanto que muitos estudos focam em métodos para resolução do problema. Em aplicações reais, algumas adaptações devem ser realizadas no modelo de forma a representar as particularidades do caso. Para o problema de programação de projetos em estaleiros nacionais, muitas características particulares do problema tiveram que ser consideradas no modelo, como por exemplo: função objetivo, com maximização das atividades realizadas no Brasil, e tempo de deslocamento entre estaleiros. As características do problema consideradas no modelo serão detalhadas no capítulo 3.

Na Tabela 1, apresentada a seguir, são apresentadas, de forma resumida, as referências teóricas abordadas nessa subseção.

Tabela 1: Referências resumidas sobre modelos RCPSP.

<b>Artigo</b>	<b>Principais pontos abordados</b>
Abbasi <i>et al.</i> (2006)	Apresenta modelagem com dois objetivos.
Artigues <i>et al.</i> (2013)	Otimização robusta do RCPSP considerando incertezas.
Besikci <i>et al.</i> (2015)	RCPSP considerando multimodos.
Bianco <i>et al.</i> (1998)	RCPSP considerando multimodos e heurísticas para resolução.
Blazewicz <i>et al.</i> (1983)	Apresenta principais modelos de RCPSP.
Brucker <i>et al.</i> (1999)	Diferentes modelagens e métodos de resolução para o RCPSP.
Bruni <i>et al.</i> (2011)	Heurística para resolução do RCPSP considerando incertezas.
Charkraborty <i>et al.</i> (2016)	RCPSP considerando multimodos.
Cheng <i>et al.</i> (2015)	Aplicação de modelo RCPSP na programação de ampliação de capacidade em uma fábrica.
Dinsmore e Silveira (2013)	Referência sobre gerenciamento de projetos.
Fawzan e Haouari (2005)	Apresenta modelagem com dois objetivos.
Ginzburg e Gonik (1998)	Heurística para o RCPSP considerando multimodos.
Ginzburg <i>et al.</i> (2003)	Simulação aplicada a programação de projetos.
Haase <i>et al.</i> (1998)	Estudo aplicado de modelo RCPSP para programação de cursos em companhia aérea.
Hartman e Briskorn (2010)	Extensões do modelo RCPSP para diferentes aplicações.
Kellenbrink e Helber (2015)	RCPSP considerando multimodos.
Klein e Scholl (2000)	Apresentação de heurística para resolução do RCPSP.
Koné <i>et al.</i> (2011)	Compara modelagens de tempo discreto e contínuo.
Koné <i>et al.</i> (2012)	Apresenta modelagens considerando recursos não renováveis e recursos dinâmicos.
Kopanos <i>et al.</i> (2014)	Compara modelagens de tempo discreto e contínuo.
Kreter <i>et al.</i> (2016)	Diferentes modelagens e métodos de resolução para o RCPSP.
Naber e Kolisch (2014)	Modelos de RCPSP considerando recursos dinâmicos.
Paraskevopoulos <i>et al.</i> (2012)	Heurística para resolução do RCPSP.
Ranjbar <i>et al.</i> (2013)	RCPSP com função objetivo de minimizar atrasos das atividades através de algoritmos e CPLEX.
Silva e Ochi (2011)	Apresenta modelagens considerando recursos não renováveis e recursos dinâmicos.

Tsai e Gemmill (1988)	Programação de atividades através de busca tabu.
Yamashita e Morabito (2007)	Apresentação de um algoritmo <i>branch-and-bound</i> para resolução do RCPSP.
Zheng e Wang (2015)	Simulação multi-agentes para resolução do RCPSP.

## 2.2 O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS E INCERTEZAS NA DURAÇÃO DAS ATIVIDADES

Na prática, na grande maioria das vezes, os projetos são incertos. Existem, por exemplo, demoras imprevistas na realização de atividades, ou ainda atividades que nunca foram realizadas antes e, por isso, são muito difíceis de ter seu tempo estimado no início do projeto. Além disso, podem ocorrer retrabalhos, indisponibilidade ou atrasos na disponibilidade de recursos necessários ou até mesmo atraso na entrega de suprimentos para determinadas atividades, o que leva a atrasos na conclusão dos projetos. Pode haver também incertezas na definição de escopo do projeto, com exclusão ou inclusão de novas atividades ao longo de sua realização (CREEMERS *et al.*, 2015; VONDER *et al.*, 2008; ABBASI *et al.*, 2006; FAWZAN & HAOUARI, 2005).

Projetos muito particulares, com alto grau de inovação, geralmente possuem elevada incerteza na duração das atividades. Isso ocorre, por exemplo, na construção civil, na indústria química e na indústria de aeronaves (FAWZAN & HAOUARI, 2005; GINZBURG *et al.*, 2003). Os estaleiros nacionais também realizam projetos muito particulares, o que expõe a incertezas na duração das atividades. Assim, levar em conta incertezas na duração das atividades é de extrema importância, uma vez que desconsiderá-las pode acarretar considerável perda de desempenho (e.g., LI & WOMER, 2015; BRUNI *et al.* 2011; HERROELEN & LEUS, 2005; VONDER *et al.*, 2008).

A variabilidade na duração de atividades em problemas de RCPSP pode ser incorporada por meio de distribuições de probabilidade (PEREZ & KUHL, 2014; BRUNI *et al.*, 2011; GINZBURG *et al.* 2003). Entretanto, em alguns casos, não se conhece a distribuição que melhor representa a incerteza nos dados aleatórios (e.g., CARVALHO *et al.*, 2016; ARTIGUES *et al.*, 2013).



Em alguns casos, o tratamento da duração estocástica das atividades é feito por meio da busca de uma solução que apresente um bom grau de robustez e atenda às restrições com elevado nível de probabilidade. Existem diferentes formas de lidar com a incerteza; uma delas consiste em penalizar cada desvio de forma individual e minimizar a penalidade total; outra consiste em aceitar o risco de desvios com certa probabilidade (ARTIGUES *et al.*, 2013; BRUNI *et al.*, 2011).

Herroelen e Leus (2005) apresentam cinco formas diferentes de abordar incertezas nos dados em modelos de RCPSP: programação reativa; programação estocástica; programação *fuzzy*; programação robusta e análise de sensibilidade. Na programação reativa, o problema é reotimizado após a ocorrência de um evento inesperado, ajustando-se o cenário base. Geralmente a reprogramação é feita minimizando a diferença entre o cenário original e o cenário futuro. Esse tipo de abordagem é considerado pobre, justamente por ser reativa à ocorrência da incerteza; ou seja, toma-se uma decisão após o evento inesperado ocorrer.

A abordagem por programação estocástica considera variáveis aleatórias com distribuição conhecida e decisões em dois ou mais estágios. Apesar de ser uma abordagem melhor quando comparada à programação reativa, em geral exige grande esforço computacional. Talvez por isso, haja poucas referências na literatura dessa abordagem em modelos RCPSP (e.g., LI & WOMER, 2015; HERROELEN & LEUS, 2005; TSAI & GEMMILL, 1998).

Quando não se conhece a distribuição das variáveis aleatórias, pode-se aplicar a programação *fuzzy* (HERROELEN & LEUS, 2005), que utiliza funções de pertinência em vez de distribuição de probabilidade. Ainda assim, existe a dificuldade de se determinar, no RCPSP, quais os números *fuzzy* que representam determinada variável aleatória (KNYAZEVA *et al.*, 2015; MASMOUDI & HAIT, 2013).

Na área de programação robusta, muitas técnicas foram recentemente publicadas. Uma delas consiste em planejar atividades com folgas, já como uma contingência para possíveis eventos não planejados. Outra abordagem consiste em maximizar, na função objetivo, as folgas que não impactam a duração total do projeto; ou ainda propor antecipadamente várias programações para eventuais mudanças em caso de eventos aleatórios (e.g., TABRIZI & GHADERI, 2016; ARTIGUES *et al.*, 2013; VONDER *et al.*, 2008; HERROELEN & LEUS, 2005, LIN *et al.*, 2004).

Tratar a incerteza via a busca de uma solução robusta para o problema de programação de projetos é um campo de pesquisa em crescimento. Elaborar uma solução proativa, que inclui tempos de folga entre as atividades, melhora a estabilidade da solução (VONDER *et al.*, 2008; HERROELEN & LEUS, 2005).

Outra forma de abordar a incerteza em modelos de RCPSP, segundo Herroelen e Leus (2005) é através de análise de sensibilidade. Este tipo de abordagem é bastante recente e é focado em flexibilidade. Através desse tipo de análise, é possível responder perguntas do tipo “e...se?”, ou seja, testar diferentes cenários e analisar o seu impacto no desempenho global do projeto (HERROELEN & LEUS, 2005; BATEMAN *et al.*, 2013). Existem poucos trabalhos nessa linha no estudo de programação de máquinas e programação de projetos (MOHAGHAR *et al.*, 2016; PEREZ & KUHL, 2014).

A Tabela 2, apresentada a seguir (adaptada de HERROELEN & LEUS, 2005), ilustra as diferentes abordagens para o RCPSP com parâmetros incertos, com propostas para lidar com incertezas nas fases de planejamento (programação base) e de controle (durante a execução do projeto).

Tabela 2: Abordagens para programação sob incerteza (adaptado de Herroelen & Leus, 2005)

<b>Programação base</b>	<b>Durante execução do projeto</b>
Sem programação base	Programação dinâmica de atividades
Programação base sem variabilidade	Programação reativa e decisões gerenciais
Programação base robusta	Análise de sensibilidade

Na tabela apresentada, é possível verificar, de forma resumida, as possíveis abordagens para a programação de projetos considerando incertezas. A programação base pode ser realizada através de modelos determinísticos, com valores médios para as durações das atividades, ou através de programação robusta (pró-ativa). Existem, ainda, abordagens que desconsideram a elaboração de uma programação base.

Bertsimas e Sim (2004) apresentam uma interessante abordagem para programação linear robusta. A ideia da programação robusta está em aceitar uma solução sub-ótima para os valores nominais de dados incertos, mas que seja viável e próxima da solução ótima quando esses dados variam. Ao realizar otimizações considerando valores esperados ou

valores nominais, pode-se chegar a soluções que não sejam factíveis para algumas realizações dos parâmetros incertos. A solução proposta, portanto, deve ser menos sensível à incerteza nos dados. Desta forma, deve-se buscar soluções para as realizações mais extremas dos parâmetros estocásticos (CARVALHO *et al.*, 2016; BERTSIMAS & SIM, 2004).

Esse tipo de abordagem pode ser muito conservadora, visto que dificilmente todos os parâmetros estocásticos se comportaram como no pior caso (Bertsimas e Sim, 2004). Dessa forma, esses autores apresentam uma abordagem mais atrativa, que analisa o equilíbrio (*trade-off*) entre a robustez do modelo e o grau de conservadorismo. A vantagem do modelo proposto pelos autores é que a formulação se mantém como um problema de otimização linear, conforme apresentado abaixo:

$$\max c'x \quad (2.1)$$

$$\text{s.a.} \quad Ax \leq b \quad (2.2)$$

$$l \leq x \leq u, \quad (2.3)$$

com incerteza nos dados da matriz A.

Considerando uma linha específica  $i$  da matriz  $[A]_{ij}$ , que representa o conjunto de coeficientes incertos, e  $J_i$  o conjunto de coeficientes da linha  $i$ , então cada  $A_{ij}, j \in J_i$  é modelado como uma variável aleatória  $\tilde{a}_{ij}$  que assume valores no intervalo  $[A_{ij} - \hat{a}_{ij}, A_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ . Para essa formulação, não é necessário conhecer a distribuição de probabilidade que representa os dados incertos, apenas os valores mínimo e máximo.

Para cada  $i$ , Bertsimas e Sim (2004) introduzem um parâmetro  $\Gamma_i$  que assume valor no intervalo  $[0, |J_i|]$  e que representa o grau de conservadorismo. O objetivo é que apenas  $\Gamma_i$  dos coeficientes assumam valores diferentes do valor nominal. Ou seja, apenas alguns parâmetros serão considerados robustos.

Dessa forma, a função de proteção da  $i$ -ésima restrição pode ser representada e incorporada ao modelo original (BERTSIMAS & SIM, 2004):

$$\max \sum_j \hat{a}_{ij} z_{ij} \quad (2.4)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_j z_{ij} \leq \Gamma_i \quad (2.5)$$

$$0 \leq z_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J_i. \quad (2.6)$$

Carvalho *et al.* (2016) apresentam uma aplicação de modelagem robusta baseada na abordagem desenvolvida por Bertsimas e Sim (2004). Trata-se de uma aplicação para decisões relacionadas ao planejamento tático de capacidade em uma indústria de produtos por encomenda. Dado que as durações das atividades de produção no contexto apresentado são incertas, um modelo determinístico não atende a necessidade dos tomadores de decisão, uma vez que ajustes são frequentemente necessários, à medida que ocorrem desvios em relação aos valores utilizados no planejamento. Dessa forma, para evitar ciclos de replanejamento, os autores propuseram um modelo de otimização considerando incertezas que busca uma solução robusta.

Carvalho *et al.* (2016) argumentam que um modelo robusto possui vantagem em relação ao modelo estocástico, pois não é necessário conhecer a distribuição de probabilidade dos parâmetros incertos. Basta, apenas, conhecer limitantes inferiores e superiores para os dados. Segundo os autores, no contexto da indústria por eles abordada, é difícil obter informações de distribuição de duração das atividades, uma vez que cada demanda representa um projeto único. Essa característica é bastante similar à indústria naval brasileira, foco desta pesquisa.

Artigues *et al.* (2013) aplicam modelos de otimização robusta ao RCPSP considerando incerteza nas durações das atividades. Além disso, os autores também apresentam um procedimento heurístico para tratar problemas de maior porte, sem garantia de otimalidade. As soluções robustas são confrontadas com o cenário otimista e o cenário esperado, a fim de se avaliar o modelo proposto.

Vonder *et al.* (2008) apresentam uma modelagem de otimização robusta para o RCPSP que inclui folgas entre as atividades, como uma forma de lidar com as incertezas na duração das atividades. Com base em uma solução viável do RCPSP determinístico, busca-se espaçar as atividades de forma a respeitar os prazos de conclusão do projeto. Para determinar as folgas, os autores desenvolveram três diferentes algoritmos: o primeiro, com foco na variabilidade do tempo de duração das atividades; o segundo, com foco no peso e importância da atividade para o projeto; e o terceiro como uma combinação entre os dois. Dentre os algoritmos apresentados, o terceiro foi o que apresentou melhor resultado (VONDER *et al.*, 2008).

Perez e Kuhl (2014), por sua vez, apresentam um estudo de otimização baseado em simulação para encontrar um equilíbrio entre custo e prazo no problema de programação de projetos. O objetivo do estudo é encontrar uma programação com menor custo esperado e com penalizações para atraso em relação aos prazos estabelecidos. O modelo proposto pode ser aplicado na fase de planejamento do projeto ou durante sua execução, para realização de ajustes na programação. O modelo de simulação alimenta a estratégia de otimização que, de forma iterativa, altera valores de entrada do modelo de simulação e avalia uma nova alternativa. A Figura 3, apresentada a seguir, ilustra o processo iterativo proposto por Perez e Kuhl (2014).

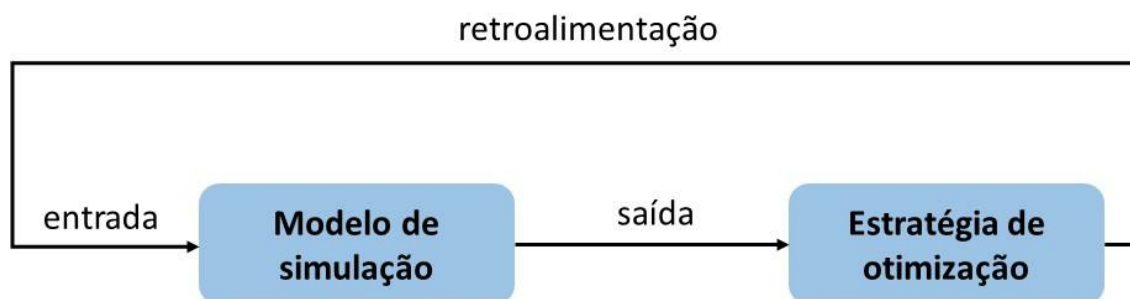


Figura 3 – Otimização baseada em simulação (adaptado de Perez e Kuhl, 2014)

A heurística proposta pelos autores, baseada em simulação-otimização, é desenvolvida em duas etapas: na primeira, de simulação, são definidos os recursos que serão alocados em cada atividade; na segunda etapa, de otimização, após a alocação dos recursos, define-se o sequenciamento das atividades, buscando minimizar a duração média do projeto. Nesta segunda etapa, respeitam-se as relações de precedência entre as atividades e as restrições de capacidade de recursos em que são alocadas duas ou mais atividades (PEREZ & KUHLM, 2014).

Bassi *et al.* (2012) apresentam um estudo de dimensionamento de frota e programação de sondas considerando incerteza no tempo de duração das atividades. O problema de programação de frotas para exploração de campos de petróleo apresentado no artigo é, em alguns aspectos, similar à programação de atividades em estaleiros nacionais. No estudo, foi aplicado um método combinado de otimização e simulação que, segundo os autores, é adequado para problemas complexos com natureza estocástica. O problema pode ser

representado por um sequenciamento em que cada sonda possui uma fila de atividades a realizar. Cada atividade possui uma janela de tempo dentro da qual deve ser realizada.

Já no problema de programação de atividades em estaleiros nacionais, essa janela de tempo está relacionada ao prazo de conclusão do projeto. Porém, para construir uma plataforma são necessárias diferentes atividades que são realizadas em diferentes locais de um estaleiro. Esse aspecto, de sequenciamento de atividades pertencentes a um mesmo projeto com relação de precedência não existe na programação de sondas, que lida com apenas um tipo de recurso.

Muitas podem ser as razões para atrasos na execução de atividades de projetos em relação aos tempos planejados, como: dificuldade de estimar a duração, especialmente em projetos com elevado nível de inovação e imprevisibilidades relacionadas à execução das atividades. Foram encontradas, na literatura, diferentes abordagens para considerar incertezas na programação dos projetos. Uma delas, que foi considerada na programação em estaleiros nacionais, é a programação robusta.

A Tabela 3, ilustrada a seguir, apresenta, de forma resumida, o referencial teórico abordado nessa subseção.

Tabela 3: Referências resumidas sobre modelos RCPSP com incertezas.

<b>Artigo</b>	<b>Principais pontos abordados</b>
Abbasi <i>et al.</i> (2006)	Programação biobjetivo considerando robustez.
Artigues <i>et al.</i> (2013)	Aplicação de otimização robusta em estudos de RCPSP.
Bassi <i>et al.</i> (2012)	Dimensionamento e programação de sondas considerando incerteza na duração das atividades.
Bateman <i>et al.</i> (2013)	Referência de simulação de eventos discretos.
Bertsimas e Sim (2004)	É apresentada abordagem para programação linear robusta, considerando grau de conservadorismo.
Bruni <i>et al.</i> (2011)	Heurística para RCPSP considerando incerteza nas durações das atividades.
Carvalho <i>et al.</i> (2016)	Aplicação de otimização robusta em planejamento de capacidade.
Creemers <i>et al.</i> (2015)	Programação de projetos considerando incertezas.
Fawzan e Haouari (2005)	Programação biobjetivo considerando robustez.
Ginzburg <i>et al.</i> (2003)	Simulação aplicada ao RCPSP considerando incertezas.

Herroelen e Leus (2005)	São apresentadas diferentes formas de abordar incertezas em estudos de programação de projetos.
Knyazeva <i>et al.</i> (2015)	Programação <i>fuzzy</i> para o RCPSP.
Li e Womer (2015)	Programação dinâmica aplicada ao RCPSP.
Lin <i>et al.</i> (2004)	Programação robusta aplicada ao RCPSP.
Masmoudi e Hait (2013)	Programação <i>fuzzy</i> para o RCPSP.
Mohaghar <i>et al.</i> (2016)	Aplicação de otimização por simulação ao RCPSP.
Perez e Kuhl (2014)	Estudo de otimização baseado em simulação para o problema de programação de projetos.
Tabrizi e Ghaderi (2016)	Programação robusta aplicada ao RCPSP.
Tsai e Gemmill (1998)	Busca tabu aplicada ao RCPSP considerando incertezas.
Vonder <i>et al.</i> (2008)	Aplicação de otimização robusta em estudos de RCPSP, considerando folgas entre atividades.

### 3. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE ATIVIDADES EM ESTALEIROS NACIONAIS COM CLÁUSULAS DE CONTEÚDO NACIONAL MÍNIMO

Estaleiros podem ser definidos como unidades industriais equipadas para construir ou reparar embarcações. Seus principais recursos são: vagas de dique-seco e vagas de cais. Dique seco pode ser considerado a parte mais importante de um estaleiro. Trata-se de um espaço construído à margem de um braço de água, em geral no mar. Esse espaço é capaz de receber uma embarcação para manutenção ou fabricação, a qual fica apoiada em estruturas localizadas dentro do dique. Após a entrada do navio, portas localizadas entre o dique e a água são fechadas, a fim de isolar a área onde se encontra a embarcação. A água que está dentro do dique é bombeada para fora, até que este fique totalmente seco. Para a saída da embarcação, por sua vez, a água é transferida para dentro até um nível adequado, permitindo a abertura das portas sem que haja risco à estabilidade da plataforma ou do navio que está dentro do dique. O cais, por sua vez, é uma estrutura fixa à beira d'água, geralmente no mar, onde a embarcação é atracada para que sejam realizadas as tarefas finais de construção (PARK *et al.*, 2016; KWON & LEE, 2015; FOSTER *et al.*, 2013).

Considera-se, neste trabalho, a montagem de plataformas de produção de petróleo do tipo FPSO, ou unidade flutuante de armazenamento de transferência (do inglês *Floating Production Storage and Offloading*). Em sua primeira etapa, a construção de uma plataforma desse tipo demanda a conversão de um casco de navio, ou a construção de um novo casco. Isso, por sua vez, requer uma vaga de dique-seco. Em seguida, a plataforma é direcionada para uma vaga de cais, onde se conclui a construção ou conversão e onde os módulos são integrados. Os módulos são plantas para o processamento ou pré-processamento do petróleo quando instalada a plataforma em alto-mar. São construídos em canteiros próprios, localizados geralmente nos estaleiros. Os canteiros, embora importantes, não constituem recursos críticos para a construção de plataformas no Brasil, pois podem ser facilmente disponibilizados em período relativamente curto de tempo.

O presente trabalho considera também projetos de construção de sondas de exploração e navios para movimentação de petróleo e derivados. São projetos que competem pelos mesmos recursos que a construção de FPSO's e influenciam, portanto, na disponibilidade destes. As atividades para construção de sondas e navios, bem como o seu



sequenciamento, são um pouco diferentes de um projeto de plataforma do tipo FPSO; entretanto, demandam, da mesma forma, vagas de cais e dique-seco.

A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, as atividades e recursos necessários à construção de uma plataforma de produção de petróleo do tipo FPSO em um estaleiro.

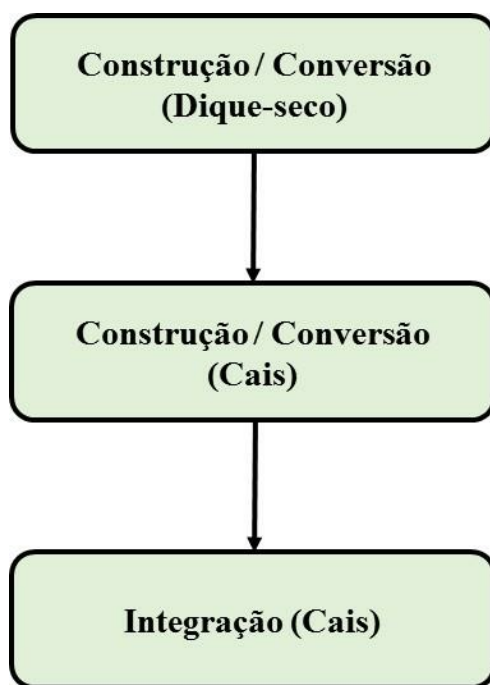


Figura 4: Sequência de atividades para construção de FPSO (próprio autor).

O objetivo do modelo proposto nesta dissertação é minimizar a exposição a multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional. Em outras palavras, o objetivo é maximizar o número de atividades realizadas em estaleiros localizados no Brasil, respeitando as restrições e particularidades do problema estudado.

Cada projeto de plataforma do tipo FPSO está associado a um projeto de produção de petróleo na costa brasileira. Portanto, para que a curva planejada de produção de óleo do país seja atingida, as plataformas devem ser entregues no prazo determinado. Antecipações são permitidas, dentro de um intervalo de tempo razoável e pré-determinado. Essas flexibilidades são importantes para, eventualmente, permitir que outras atividades sejam alocadas em um mesmo recurso, atendendo os prazos estabelecidos. No caso de não haver recursos nacionais disponíveis para a realização das atividades de um projeto no prazo definido, uma ou mais

atividades podem ser alocadas em recursos no exterior. Essa alocação, todavia, deve ser evitada, uma vez que resulta em multas.

As atividades realizadas em dique-seco e cais podem ser realizadas em diferentes estaleiros. Quando isso ocorre, existe um tempo de deslocamento entre os estaleiros, em função de sua distância. Esse tempo deve ser considerado na programação e alocação das atividades, visto que pode impactar no cumprimento dos prazos estabelecidos. As atividades de cada projeto possuem uma duração esperada definida, que é independente do recurso alocado, seja ele nacional ou estrangeiro. Não há restrição quanto à alocação de atividades dos projetos em qualquer estaleiro brasileiro.

Para atividades alocadas em recursos nacionais, existe a possibilidade de ocorrerem atrasos. Esses atrasos foram modelados seguindo a lógica de programação robusta apresentada por Bertsimas e Sim (2004) e foram analisados através de modelos de simulação de eventos discretos.

Foster *et al.* (2013) apresentam os estaleiros nacionais e os recursos disponíveis em cada um deles. Além disso, os autores apresentam sua localização, desde Pernambuco ao Rio Grande do Sul; os principais projetos entregues e em carteira em cada um dos estaleiros; recursos e capacidade de processamento.

Os estaleiros podem ser classificados quanto à sua capacidade de produção em três categorias: grande, médio ou pequeno porte. Os estaleiros de grande porte possuem área superior a 500 mil metros quadrados e, geralmente, contam com diques-seco de grandes proporções, o que lhes habilita a construir petroleiros de grande porte, sondas e plataformas para produção de petróleo (FOSTER *et al.*, 2013).

Os estaleiros de grande porte localizados no Brasil que, portanto, são objeto de estudo dessa pesquisa, são listados na Tabela 4, apresentada a seguir. A Tabela 4 mostra também a quantidade de vagas de dique-seco e cais em cada um dos estaleiros considerados no estudo.

Tabela 4: Estaleiros considerados no estudo (adaptado de Foster *et al.*, 2013)

<b>Estaleiro</b>	<b>Localização</b>	<b>Cais</b>	<b>Dique-Seco</b>
EAS – Estaleiro Atlântico Sul S.A.	Ipojuca – PE	3	1
EBR – Estaleiros do Brasil Ltda.	São José do Norte – RS	1	0
EEP – Enseada do Paraguaçu S.A.	Maragogipe – BA	2	0
EJA – Estaleiro Jurong Aracruz Ltda.	Aracruz – ES	2	1
Estaleiro BRASA Ltda.	Niterói – RJ	2	0
Estaleiro BrasFELS	Angra dos Reis – RJ	2	0
Estaleiro Inhaúma	Rio de Janeiro – RJ	2	1
Estaleiro Honório Bicalho	Rio Grande – RS	2	0
RG Estaleiro ERG1 S.A.	Rio Grande – RS	1	2
Techint Engenharia e Construção	Pontal do Paraná – PR	1	0

Na Tabela 4, são apresentados também alguns recursos que ainda não estão em operação, mas têm previsão de operar em breve. A fim de contemplá-los o modelo considera uma janela de disponibilidade dos recursos. Essa modelagem também é útil quando se deseja simular perturbações, desativando alguns recursos dentro de uma janela de tempo pertencente ao horizonte de planejamento.

#### **4. METODOLOGIA**

O modelo de programação linear inteira mista proposto nessa pesquisa visa auxiliar a tomada de decisão referente à alocação de projetos de construção de plataformas em estaleiros nacionais, de forma a melhor atender às exigências de conteúdo nacional dos projetos. Para isso, analisar de forma integrada a capacidade da indústria nacional, bem como a demanda por parte do setor de óleo e gás, é fundamental para um planejamento mais assertivo. Além disso, a proposta desenvolvida permite, ainda, a simulação de diferentes cenários considerando disponibilidade de todos os estaleiros nacionais ou retirando alguns recursos.

Geralmente, a decisão quanto à alocação de projetos a recursos é realizada tendo em vista um horizonte de 15 anos, sendo esta uma visão mais de longo prazo. Eventualmente, análises pontuais em relação à disponibilidade de recursos ou cenários de sensibilidade são realizadas em um horizonte menor, geralmente de 5 anos, para apoio à tomada de decisão em um nível tático.

Atualmente, para alocar os projetos aos recursos e analisar a disponibilidade de vagas em dique-seco e cais no Brasil, a indústria petrolífera brasileira ordena os projetos de acordo com a sua data planejada de entrega, sem considerar possível flexibilidade para antecipação na realização das atividades e sem considerar folgas entre as atividades. De acordo com as suas relações de precedência, as atividades são programadas de acordo com o instante máximo de início e término. Utilizando a informação referente à necessidade de vagas de dique-seco e vagas de cais para realização de cada atividade, a necessidade de recursos é analisada ao longo do tempo de planejamento, e são identificados instantes nos quais os recursos nacionais não são suficientes para atendimento de toda a demanda planejada.

Na análise realizada atualmente pela indústria petrolífera brasileira, não são considerados os tempos de deslocamento entre diferentes estaleiros, no caso de um mesmo projeto realizar atividades com recursos em localizações diferentes. Atualmente, não existe também um plano de contingência estruturado para lidar com a escassez de oferta de recursos. Geralmente, analisam-se os valores de multa para os projetos que são alocados no instante crítico e define-se qual projeto será realizado no exterior. Entretanto, através de uma

programação mais precisa, é possível utilizar, de forma mais eficiente, os recursos dos estaleiros disponíveis no Brasil.

Antecipações de projetos são possíveis dentro de um intervalo razoável e definido, para que diferentes projetos possam ser alocados em um mesmo recurso. Essa flexibilidade pode permitir redução de custos, associados principalmente a multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional. Além das antecipações, eventualmente folgas são inseridas nas durações das atividades, de forma a evitar possíveis atrasos. O consumo dessas folgas também permite flexibilizar a programação das atividades, de forma a otimizar a utilização dos recursos nacionais.

O modelo abordado nesta pesquisa realiza uma análise de dados, de forma a estimar possíveis atrasos de atividades a serem considerados no planejamento. Esses atrasos são representados por um parâmetro, conhecido como nível de conservadorismo, e proposto por Bertsimas e Sim (2004). Esse parâmetro pode ser alterado de acordo com o perfil de risco do gestor. Ao realizar um planejamento com menor nível de conservadorismo, assume-se uma probabilidade maior de ocorrerem atrasos não planejados. Por outro lado, neste caso, evita-se a realização de atividades no exterior, e consequentemente reduz-se a exposição a multas. Considerando um nível de conservadorismo maior, reduz-se a exposição a atrasos, o que ocasiona maior alocação em recursos no exterior e, portanto, maior incidência de multas.

A Figura 5 ilustra o processo de decisão proposto, através do uso de modelos de otimização e simulação. Os modelos, que serão discutidos nos próximos capítulos, servem como apoio à tomada de decisão, visando melhor utilização de recursos nacionais, redução de atrasos na entrega dos projetos e redução da exposição a multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional.

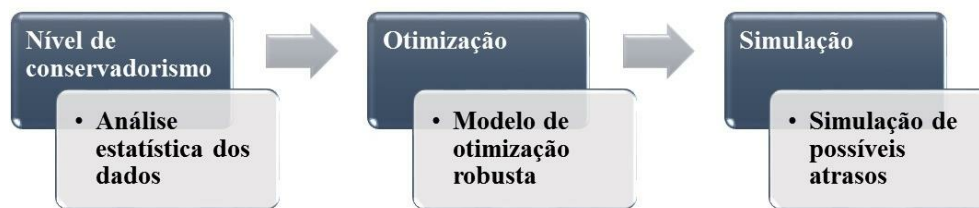


Figura 5: Processo de análise proposto (próprio autor).

A partir da análise estatística dos dados históricos, define-se o nível de conservadorismo que será aplicado no modelo de otimização proposto, de acordo com a exposição ao risco arbitrada pelo gestor. Em seguida, aplica-se o modelo de otimização considerando os dados de todos os projetos; esse modelo utiliza o *software* AIMMS.

Os resultados apresentados na fase de otimização são: data de início e término de cada atividade e o recurso necessário para a realização da atividade. Se determinada atividade não for alocada em nenhum recurso nacional, interpreta-se que esta atividade será realizada no exterior. Como simplificação, não foi considerada restrição de capacidade em recursos estrangeiros, o que é, para o problema proposto, uma premissa bastante razoável.

As informações do modelo de otimização são inseridas no modelo de simulação, implementado no *software* PROMODEL, através do qual a duração das atividades é modelada como uma variável aleatória com distribuição de probabilidade baseada nos dados históricos analisados. Na simulação, é possível analisar a eficiência da programação proposta pelo modelo de otimização, verificando, principalmente, os atrasos em relação à data de término planejada para cada projeto.

Eventualmente, alguns ajustes pontuais na programação podem ser realizados e analisados através do modelo de simulação, como forma de resposta à imprevisibilidades ou análise de sensibilidade nas soluções a serem aplicadas ao problema prático. Alguns ajustes possíveis são: alteração de recurso a executar determinada atividade, alocação de uma atividade no exterior, consideração de maior atraso na duração de alguma atividade específica, dentre outros. Esses ajustes são úteis como forma de gerenciar possíveis atrasos no decorrer na execução dos projetos. Essa aplicação para o modelo de simulação

desenvolvido, entretanto, não foi foco dessa pesquisa e, portanto, não será apresentado neste trabalho.

Na literatura, foram encontrados poucos trabalhos de aplicações práticas do modelo de RCPSP na indústria, como o problema abordado nessa pesquisa. Além disso, não foram encontrados artigos que abordem o uso da simulação na validação de uma programação de atividades de projeto.

## 5. MODELAGEM MATEMÁTICA

Introduzem-se, neste capítulo, os modelos de otimização e simulação propostos neste trabalho como partes integrantes de uma ferramenta de apoio à decisão referente à alocação de projetos de construção de plataformas em estaleiros nacionais, com vistas ao atendimento às cláusulas de conteúdo nacional.

### 5.1 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

O modelo aqui proposto baseia-se na modelagem a tempo contínuo apresentada por Kopanos *et al.* (2014) e na proposta de abordagem robusta desenvolvida por Bertsimas e Sim (2004). Em seu desenvolvimento, foram consideradas as particularidades do problema estudado, apresentadas nos capítulos anteriores.

A seguir, apresentam-se os conjuntos considerados na modelagem: os conjuntos básicos que a suportam, seus parâmetros, suas variáveis de decisão contínuas e binárias, sua função objetivo e suas restrições.

#### 5.1.1 Conjuntos básicos

$P$ , conjunto de projetos;

$A_p$ , conjunto das atividades que compõem o projeto  $p$ ;

$A$ , conjunto de todas as atividades;

$TA$ , conjunto de todos os tipos de atividades;

$R$ , conjunto de todos os recursos disponíveis no Brasil;

$R_a = \{r \in R | b_{a,r} = 1\}$ , conjunto de todos os recursos que podem ser utilizados pela atividade  $a$ ,  $a \in A$ . Note que  $b_{a,r}$  é um parâmetro introduzido na próxima subseção;

$G$ , conjunto dos pares ordenados de atividades  $(a_1, a_2)$  tais que existe relação de precedência entre o instante final da primeira atividade e o instante inicial da segunda atividade;

$S$ , conjunto dos pares não ordenados de atividades  $(a_1, a_2)$  que podem compartilhar recurso;



$H$ , conjunto dos pares ordenados de atividades  $(a_1, a_2) \in G$  tais que, se executadas no Brasil, devem utilizar o mesmo recurso.

### 5.1.2 Parâmetros do modelo

$B_{a,r} \in \{0,1\}$ ,  $B_{a,r} = 1$  indica que a atividade  $a$  pode usar o recurso nacional  $r$  para sua execução;  $B_{a,r} = 0$  caso contrário;

$D_a$ , duração média/planejada da atividade  $a$  (em dias);

$P_a$ , projeto do qual a atividade  $a$  faz parte;

$DV_a$ , desvio/atraso máximo na duração da atividade  $a$  (em dias);

$[LI_a, LS_a]$ , intervalo de tempo que deve conter integralmente a execução da atividade  $a$ ;

$TI_{a_1,a_2}$ , quantidade mínima de tempo que deve ocorrer entre o instante final da primeira atividade  $(a_1)$  e o instante inicial da segunda atividade  $(a_2)$ ,  $\forall (a_1, a_2) \in G$ ;

$TS_{a_1,a_2}$ , quantidade máxima de tempo que deve ocorrer entre o instante final da primeira atividade  $(a_1)$  e o instante inicial da segunda atividade  $(a_2)$ ,  $\forall (a_1, a_2) \in G$ ;

$TA_a$ , tipo da atividade  $a$ , que pode ser *Dique* ou *Cais*;

$E_r$ , estaleiro onde o recurso  $r$  se encontra;

$TD_{e_1,e_2}$ , tempo de deslocamento entre o estaleiro  $e_1$  e o estaleiro  $e_2$ ;

$[DI_r, DS_r]$ , intervalo de tempo em que o recurso  $r$  encontra-se disponível;

$\Gamma$ , grau de robustez do modelo (representa o número de atividades consideradas com atraso).

### 5.1.3 Variáveis de decisão

$u_{a,r} \in \{0,1\}$ ,  $u_{a,r} = 1$  indica que a atividade  $a$  será alocada ao recurso nacional  $r$ ;  $u_{a,r} = 0$  caso contrário;

$i_a \in \mathbb{R}$ , instante de início da atividade  $a$ ;

$f_a \in \mathbb{R}$ , instante de término da atividade  $a$ ;

$z_a \in \{0,1\}$ ,  $z_a = 1$  indica que a atividade  $a$  é considerada com atraso na programação;  $z_a = 0$  caso contrário;

$w_{a_1,a_2} \in \{0,1\}$ ,  $w_{a_1,a_2} = 1$  indica que a atividade  $a_1$  precede a atividade  $a_2$  quando ambas compartilham um mesmo recurso,  $\forall (a_1, a_2) \in S$ ;  $w_{a_1,a_2} = 0$  caso contrário.

#### 5.1.4 Função objetivo

$$\max \sum_{a \in A} \sum_{r \in R_a} u_{a,r} \quad (5.1)$$

#### 5.1.5 Restrições

$$f_a = i_a + D_a + DV_a z_a \quad \forall a \in A \quad (5.2)$$

$$i_a \geq LI_a \quad \forall a \in A \quad (5.3)$$

$$f_a \leq LS_a \quad \forall a \in A \quad (5.4)$$

$$i_{a_2} \geq f_{a_1} + TI_{a_1,a_2} \quad \forall (a_1, a_2) \in G \quad (5.5)$$

$$i_{a_2} \leq f_{a_1} + TS_{a_1,a_2} \quad \forall (a_1, a_2) \in G \quad (5.6)$$

$$i_{a_2} \geq f_{a_1} + (u_{a_1,r_1} + u_{a_2,r_2} - 1)TD_{er_1,er_2} \quad \forall (a_1, a_2, r_1, r_2) | TA_{a_1} = Dique, TA_{a_2} = Cais, p_{a_1} = P_{a_2}, B_{a_1,r_1} = B_{a_2,r_2} = 1, (a_1, a_2) \in G, e_{r_1} \neq e_{r_2} \quad (5.7)$$

$$\sum_{r \in R_a} u_{a,r} \leq 1 \quad \forall a \in A \quad (5.8)$$

$$i_a \geq (DI_r - LI_a)u_{a,r} + LI_a \quad \forall (a, r) | r \in R_a \quad (5.9)$$

$$f_a \leq DS_r + (LS_a - DS_r)(1 - u_{a,r}) \quad \forall (a, r) | r \in R_a \quad (5.10)$$

$$w_{a_1,a_2} + w_{a_2,a_1} \geq u_{a_1,r} + u_{a_2,r} - 1 \quad \forall (a_1, a_2, r) | B_{a_1,r} = B_{a_2,r} = 1, (a_1, a_2) \in S \quad (5.11)$$

$$w_{a_1,a_2} + w_{a_2,a_1} \leq 1 \quad \forall (a_1, a_2) \in S \quad (5.12)$$

$$i_{a_2} \geq f_{a_1} - (LS_{a_1} - LI_{a_2})(1 - w_{a_1,a_2}) \quad \forall (a_1, a_2) \in S \quad (5.13)$$

$$u_{a_2,r} \geq u_{a_1,r} \quad \forall (a_1, a_2) \in H \quad (5.14)$$

$$\sum_{a \in A} z_a = \Gamma \quad (5.15)$$

$$z_a \leq \sum_{r \in R_a} u_{a,r} \quad \forall a \in A \quad (5.16)$$

### 5.1.6 Descrição do modelo proposto

A função objetivo (equação 5.1) é a quantidade de atividades alocadas em recursos nacionais, que deve ser maximizada. Caso a atividade seja realizada em um recurso no exterior, todas as variáveis  $u_{a,r}$  referentes a essa atividade são iguais a zero. É justamente essa decisão que se busca evitar, para que o maior número possível de atividades seja realizado em recursos nacionais.

As restrições (5.2 a 5.4) determinam a janela de tempo em que uma atividade pode ser realizada no cronograma. O conjunto de restrições (5.2) garante a relação entre o instante de término e de início de cada atividade, ou seja, a atividade deve terminar no instante equivalente ao início da atividade acrescido ao tempo de duração. O elemento  $DV_{az_a}$  é referente aos possíveis atrasos, controlados através da restrição (5.15).

As restrições (5.3) são referentes ao limite mínimo de início da atividade enquanto que as restrições (5.4) se referem ao seu limite máximo de término. Uma atividade deve iniciar depois do limite mínimo de início e deve terminar antes do limite máximo de término.

As restrições (5.5) e (5.6) garantem, por sua vez, as relações de precedência entre as atividades, bem como o tempo mínimo e máximo entre elas. Para atividades  $(a_1, a_2) \in G$ , entre as quais existe uma relação de precedência, a restrição (5.5) garante que o instante inicial da segunda atividade não deve ser menor que o instante de término da primeira atividade adicionado do intervalo mínimo entre as duas atividades, que deve ser respeitado. Já o conjunto de restrições (5.6) garante que o instante inicial da segunda atividade não deve ser maior que o instante de término da primeira atividade adicionado do intervalo máximo entre as atividades, que também deve ser respeitado.

A restrição (5.7) é responsável por modelar o tempo de deslocamento entre os estaleiros para as atividades consecutivas realizadas no dique e no cais de um mesmo projeto. Para atividades pertencentes ao mesmo projeto e com relação de precedência, em que a primeira atividade deve ser realizada em uma vaga de dique-seco e a segunda deve ser realizada em uma vaga de cais, a restrição (5.7) é válida se ambas as atividades são alocadas em estaleiros diferentes. Neste caso, as variáveis de decisão  $u_{a_1,r_1} = u_{a_2,r_2} = 1$  e, portanto,

a equação (5.7) passa a ser  $i_{a_2} \geq f_{a_1} + TD_{er_1,er_2}$ , ou seja, o instante de início da segunda atividade deve ser maior que o instante de término da primeira atividade, somado do tempo de deslocamento entre os dois estaleiros. No caso de as atividades serem alocadas no mesmo estaleiro, pelo menos uma variável de decisão será nula e a equação será:  $i_{a_2} \geq f_{a_1}$ .

A restrição (5.8), por sua vez, garante que toda atividade é alocada em, no máximo, um recurso nacional. Atividades que não são alocadas a nenhum recurso são interpretadas como realizadas no exterior. Para cada atividade  $a \in A$ , no máximo uma variável de decisão  $u_{a,r}$  será diferente de zero e indica em qual recurso a atividade é realizada. No caso de todas as variáveis  $u_{a,r}$  serem nulas, a atividade é realizada em um recurso estrangeiro.

As restrições (5.9) e (5.10) garantem que se uma atividade for alocada a um recurso, então a atividade deve ser executada dentro da janela de disponibilidade do recurso; nesse caso, temos que  $u_{a,r} = 1$ . Dessa forma, a restrição (5.9) é ativada:  $i_a \geq DI_r$  e garante que o instante de início da atividade deve ser maior ou igual ao início da disponibilidade do recurso. De forma análoga, a restrição (5.10) é ativada, o que garante que  $f_a \leq DS_r$ , ou seja, o instante de término de realização da atividade deve ser menor que o instante final de disponibilidade do recurso que irá realizá-la.

As restrições (5.11-5.13) ativam as variáveis de sequenciamento quando essas atividades estão alocadas no mesmo recurso. Observando as restrições (5.11) pode-se verificar que se  $u_{a_1,r} = 1$  e  $u_{a_2,r} = 1$ , então as variáveis  $w_{a_1,a_2}$  e  $w_{a_2,a_1}$ , que são variáveis de sequenciamento de atividades em um mesmo recurso são ativadas. As restrições (5.12), por sua vez, garantem que apenas uma das variáveis:  $w_{a_1,a_2}$  ou  $w_{a_2,a_1}$  é ativada. A restrição (5.13) garante que, para atividades alocadas no mesmo recurso,  $w_{a_1,a_2} = 1 \Rightarrow a_1$  termina antes de  $a_2$  começar.

A restrição (5.14), por sua vez, garante que os pares de atividades em  $H$  utilizarão o mesmo recurso, modelagem utilizada para que as atividades de cais realizadas em sequência não sejam alocadas em diferentes recursos.

A restrição (5.15) é baseada em Bertsimas e Sim (2004) e controla o grau de robustez, através do parâmetro  $\Gamma$ . Esse parâmetro controla quantas atividades serão consideradas como o pior caso (duração máxima) para considerar possíveis atrasos na programação.

Por fim, a restrição (5.16) garante que a restrição (5.15) contará apenas possíveis atrasos em atividades alocadas em recursos nacionais. Essa restrição foi adicionada pois, analisando dados históricos conclui-se que atividades alocadas em estaleiros no exterior, geralmente alocadas em estaleiros asiáticos, não costumam atrasar. Busca-se, portanto, controlar e planejar os possíveis atrasos que acontecem em estaleiros nacionais, que são mais comuns.

Quais atividades são consideradas com atraso é uma decisão do modelo. Essa premissa é razoável, visto que não existe muita variabilidade na duração planejadas das atividades e nos tempos de atrasos considerados no modelo.

O modelo apresentado foi implementado no *software* AIMMS, versão 4.2 e solucionado através do resolvidor GUROBI em um computador Intel Core – 2,00 GHz, RAM 8GB e HD de 500GB, com sistema operacional Windows 7.

## 5.2 DEFINIÇÃO DO GRAU DE CONSERVADORISMO

Uma contribuição desta pesquisa é o método proposto para definição do grau de conservadorismo aplicado nos estudos realizados, através de uma análise estatística dos dados do problema.

No modelo proposto e apresentado no capítulo anterior, o parâmetro  $\Gamma$  representa a quantidade de atividades que serão consideradas com atraso na otimização. Para definição deste parâmetro, de forma a se obter cenários coerentes com o problema realizado, foram analisados os dados históricos de duração das atividades realizadas por estaleiros nacionais. Verificou-se qual a probabilidade de uma atividade estar no pior caso.

Definiu-se como pior caso os seis últimos meses da atividade com maior duração, ou seja. Definida a atividade com maior duração, e verificou-se, nos dados históricos, quais atividades terminaram com uma diferença menor ou igual a seis meses em relação a essa atividade. A quantidade de atividades identificadas (quantidade  $p$ ) são as atividades que estão no pior caso. Para calcular a probabilidade de se estar nesse pior cenário, dividiu-se a quantidade  $p$  pelo total de atividades, chegando a um valor de 0,3. Isso quer dizer que, existe 30% de uma determinada atividade estar no pior caso de duração.

Com essa informação, atribuiu-se uma distribuição de Bernoulli para o evento de a atividade pertencer ou não ao pior caso.

A distribuição de Bernoulli, segundo Meyer (2000), é uma distribuição discreta que assume valor 0 com probabilidade  $q$  e valor 1 com probabilidade  $p$  ( $p = 1-q$ ).

$$P(X = 1) = 1 - P(X = 0) = 1 - q = p \quad (5.17)$$

Seja  $p$  a probabilidade de a duração de uma atividade estar no pior caso; o somatório de  $n$  distribuições de Bernoulli, sendo  $n$  o número total de atividades, é uma distribuição Binomial que representa a probabilidade de se ter até  $k$  atividades (entre 0 e  $n$ ) no pior caso de duração (MEYER, 2000).

### 5.3 MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação proposto foi desenvolvido no *software* PROMODEL, versão 9.2 - 2014. O objetivo principal do estudo de simulação proposto é analisar a quantidade de projetos atrasados, dada a alocação definida através do modelo de otimização. Através da simulação, foi possível considerar a variabilidade na duração das atividades, representada por uma distribuição de probabilidade e a interdependência entre os projetos que compartilham o mesmo recurso. Se uma atividade alocada em uma determinada vaga de cais ou dique atrasa, as atividades subsequentes alocadas no mesmo recurso podem sofrer impactos e atrasar também.

Dessa forma, os principais dados de saída do modelo de otimização são utilizados como dados de entrada no modelo de simulação proposto. Essas informações são: alocação de atividades a recursos e as datas de início e término de cada atividade.

Além das informações de saída do modelo de otimização, são inseridas também no modelo de simulação as curvas de distribuição de probabilidade para as durações das atividades. Essas curvas foram obtidas através da análise de dados históricos dos projetos realizados, que foram os mesmos dados utilizados para cálculo da distribuição de Bernoulli, apresentado anteriormente. Apesar de utilizarem os mesmos dados históricos, os modelos de otimização e simulação propostos apresentam abordagens diferentes para lidar com a

incerteza no problema. Enquanto que no modelo de otimização é proposta uma abordagem robusta, através da probabilidade de se estar no pior caso, no modelo de simulação a duração das atividades é modelada através de uma distribuição probabilística, baseada nos dados históricos.

Considerou-se que não há diferença de desempenho entre estaleiros brasileiros, isto é, a duração de determinada atividade não depende do estaleiro no qual ela foi alocada. Sendo assim, com o modelo de simulação proposto é possível validar a programação e as alocações propostas pelo modelo de otimização, considerando a distribuição de probabilidade na duração das atividades.

### 5.3.1 Lógica do modelo de simulação

Antes da implementação computacional do modelo de simulação no *software* PROMODEL, foi desenvolvido um modelo conceitual. O modelo conceitual é uma etapa fundamental em um projeto de simulação. Nesta fase, o processo a ser simulado deve ser representado utilizando alguma técnica específica, que ilustre o que deverá ser considerado no modelo de simulação. Esta etapa é muito importante pois permite melhor entendimento do processo a ser simulado, facilita a implementação computacional e fornece diretrizes para a fase de coleta de dados para alimentar o simulador (FURIAN *et al.*, 2015; BATEMAN *et al.*, 2013).

O modelo conceitual, ilustrado a seguir, foi desenvolvido com base na técnica IDEF-SIM, apresentada por Bateman *et al.* (2013) e aplicada em diversos estudos de simulação, como por exemplo Montevechi *et al.* (2010), Lima *et al.* (2011) e Pinho e Moraes (2010). Esta técnica pertence à família IDEF que, por sua vez, é baseada na Análise Estruturada e *Design Technique* (SADT) – linguagem gráfica criada a partir de uma solicitação da Força Aérea dos EUA. Leal (2008) apresenta com mais detalhes a técnica do IDEF-SIM e suas origens.

A Figura 6 apresenta o modelo conceitual elaborado, que serviu como base para a construção do modelo computacional.

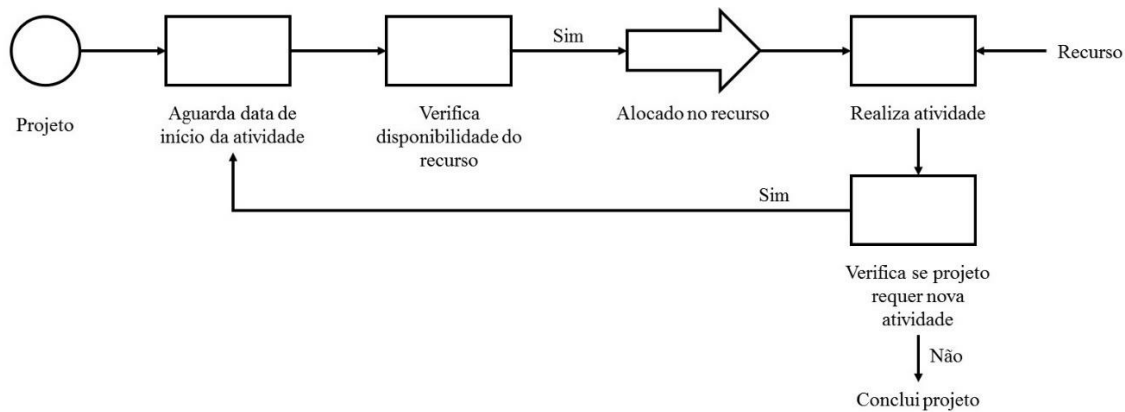


Figura 6: Modelo conceitual do módulo de simulação

No modelo de simulação, os projetos são listados em ordem crescente de data de início da primeira atividade. O relógio do simulador indica quando uma determinada atividade deve ser iniciada. Neste momento, verifica-se se o recurso no qual a atividade foi alocada está disponível. Cada recurso possui capacidade de processar uma atividade por vez. Em caso afirmativo, o projeto irá ocupar este recurso. Caso contrário, o início da atividade deve aguardar a disponibilidade do recurso.

Ao iniciar uma atividade, o recurso no qual ela foi alocada fica indisponível para realizar qualquer outra atividade durante o tempo de execução, definido por uma distribuição de probabilidade baseada nos dados históricos.

Ao concluir a atividade, o recurso deve ser liberado. Nesse momento, verifica-se a data de início da próxima atividade do mesmo projeto. No caso de a próxima atividade ser realiza em estaleiro diferente da anterior, deve-se respeitar o tempo de deslocamento entre os estaleiros, que é um tempo estimado em função da sua distância geográfica. Da mesma forma que foi verificado antes da realização da primeira atividade, deve-se verificar a disponibilidade do recurso no instante de início da segunda atividade.

Caso a duração de uma atividade seja maior que a duração planejada, podem haver impactos tanto no projeto ao qual esta atividade pertence, atrasando sua conclusão, quanto em outros projetos que utilizam o mesmo recurso.

A simulação é bastante importante para o problema real pois, além de verificar a viabilidade da solução ótima é possível, através do modelo de simulação proposto, alterar a programação ao longo da realização dos projetos.



## 6. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Apresenta-se, neste capítulo, os resultados obtidos através da aplicação dos modelos de simulação e otimização apresentados no capítulo anterior. Os dados referentes aos projetos e recursos para realização deste estudo foram obtidos através de bancos de dados da empresa Petróleo Brasileiro SA (Petrobras SA). Por se tratarem de informações sigilosas, eles não serão apresentados com detalhes neste trabalho. Os modelos apresentados foram solucionados em um computador Intel Core – 2,00 GHz, RAM 8GB e HD de 500GB, com sistema operacional Windows 7.

### 6.1 CÁLCULO DO GRAU DE CONSERVADORISMO PARA OTIMIZAÇÃO

Através da análise dos dados históricos, definiu-se que a probabilidade de se estar no pior caso de duração para cada atividade é de 30%.

As Figuras 7 e 8, apresentadas abaixo, ilustram a distribuição Binomial (somatório de 167 distribuições de Bernoulli) utilizada para definição do parâmetro  $\Gamma$ , utilizado para obtenção dos resultados que serão explorados a seguir. Na Figura 7 é apresentada a distribuição de probabilidade, enquanto que a Figura 8 mostra a distribuição cumulativa. Essa distribuição foi utilizada para definição do parâmetro  $\Gamma$  do modelo.

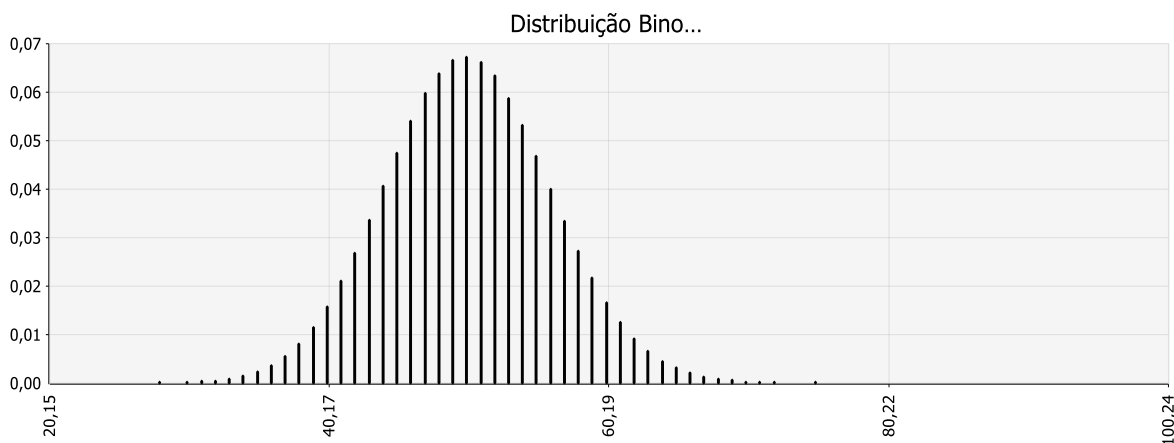


Figura 7: Distribuição binomial para definição do grau de conservadorismo do modelo

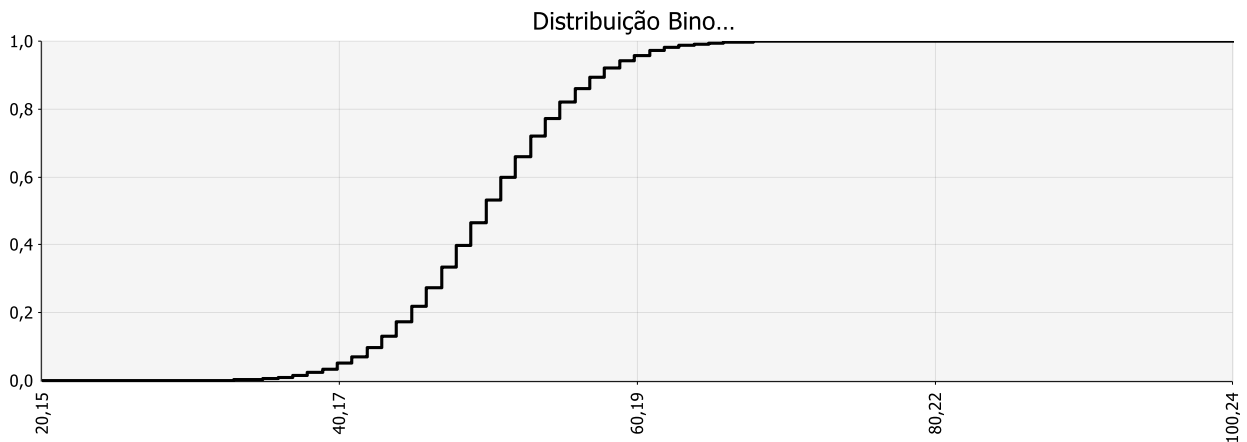


Figura 8: Distribuição binomial cumulativa para definição do grau de conservadorismo do modelo

Através da distribuição apresentada nas Figuras 7 e 8, foram analisados diferentes percentis para definir o parâmetro  $\Gamma$ . O percentil 10%, por exemplo, é de 43. Isso significa que, com 10% de probabilidade, no máximo 43 atividades estarão no pior caso. De forma análoga, ao analisar o percentil 90%, conclui-se que, com 90% de probabilidade, até 58 atividades estarão no pior caso.

## 6.2 RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A Tabela 3, apresentada a seguir, mostra os resultados computacionais para diferentes níveis de conservadorismo. Conforme explicado anteriormente, cada nível de conservadorismo representa um percentil na distribuição de atividades com possibilidade de atraso. Foi utilizado como critério de parada da otimização, *gap* de 1% ou tempo de otimização de até 20 minutos. Em todos os cenários analisados, chegou-se ao *gap* desejado com até 5 minutos de otimização.

Tabela 5: Resultados computacionais da otimização.

<b>Percentil</b>	<b>Grau de conservadorismo</b>	<b>Atividades alocadas no exterior</b>	<b>Aderência (%)</b>
Cenário determinístico	0	2	100
1%	37	5	98,78
10%	43	8	96,95
20%	45	11	95,12
30%	47	13	93,90
40%	49	16	92,07
50%	50	18	90,85
60%	52	20	89,63
70%	53	22	88,41
80%	55	24	87,20
90%	58	25	86,59
99%	64	26	85,98

Na Tabela 5, pode-se observar, para cada grau de conservadorismo considerado, a quantidade de atividades alocadas no exterior e, na quarta coluna, a aderência em relação à solução determinística ( $\Gamma=0$ ). A aderência é calculada através da razão entre a quantidade de atividades alocadas no Brasil no cenário determinístico (165 atividades), considerando a duração das atividades conforme dados de planejamento, e a quantidade de atividades alocadas no Brasil (função objetivo) para cada um dos cenários estudados, alterando o grau de conservadorismo. A fórmula para o cálculo da aderência é apresentada na equação 6.1.

$$\frac{f.o.cen}{f.o.det} \quad (6.1),$$

sendo  $f.o.cen$  o valor da função objetivo para o cenário analisado e  $f.o.det$  o valor da função objetivo no cenário determinístico (grau de conservadorismo nulo).

Na Figura 9, apresentada a seguir, é possível observar a evolução da quantidade de atividades alocadas no exterior à medida em que se aumenta o grau de conservadorismo.

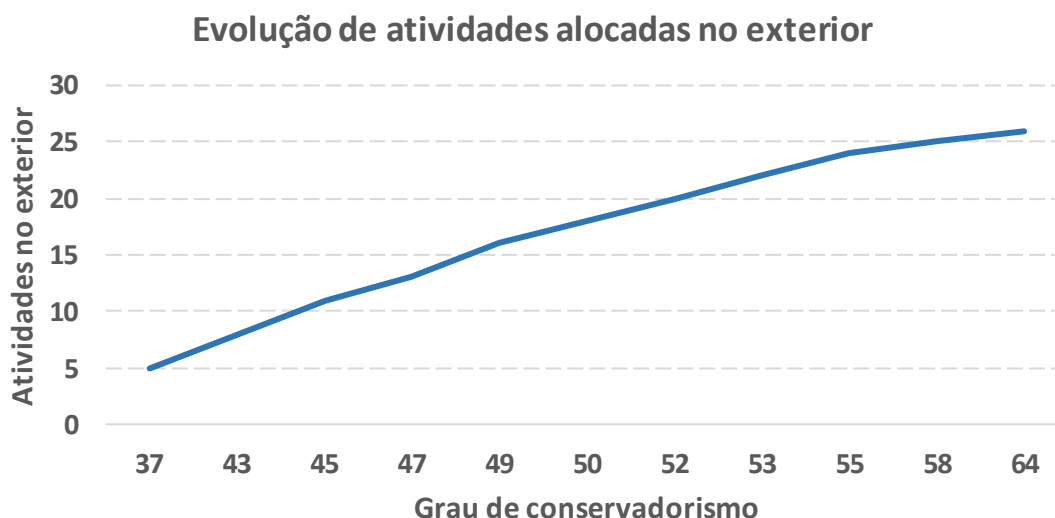


Figura 9: Evolução das atividades alocadas no exterior.

Na medida em que se aumenta o grau de conservadorismo, mais atividades são consideradas com possibilidade de atraso. Dessa forma, a necessidade de recursos no horizonte estudado é maior. Considerando que em todos os cenários a oferta de vagas em cais e dique-seco no Brasil é constante, então mais atividades devem ser realizadas em recursos no exterior. Apesar de uma solução com maior grau de conservadorismo implicar em maior exposição a multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional, considerando possíveis atrasos na duração das atividades, espera-se reduzir o atraso nas datas planejadas de primeiro óleo, relacionadas à conclusão de cada projeto de plataforma do tipo FPSO.

Todos os cenários, independente do parâmetro  $\Gamma$  considerado, chegaram à solução ótima com, no máximo 5 minutos de esforço computacional. Dado que o horizonte de planejamento é de normalmente 15 anos e considerando que o modelo será otimizado algumas vezes por ano, esse tempo não foi considerado relevante.

Além dos cenários apresentados na Tabela 3, foi analisado o cenário determinístico, considerando a duração das atividades de acordo com a média dos dados históricos ao invés da duração projetada. A duração projetada é considerada otimista, sendo sempre menor que a média histórica. Considerando esse cenário, foram alocadas 15 atividades no exterior, o que mostra que, no caso de um planejamento mais realista, haveria maior exposição a multas

por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional, entretanto, haveria menos atrasos na entrega das plataformas. Esse cenário, considerando a duração média histórica das atividades é equivalente a considerar o cenário de percentil 40% (apresentado na Tabela 3), o que levaria a uma programação considerando 49 atividades no pior caso de duração.

### 6.3 RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para executar o modelo de simulação, inicialmente foram coletados dados de duração das atividades para encontrar a distribuição de probabilidade que melhor represente essa informação. Os dados históricos de duração para os diferentes tipos de atividades foram coletados no banco de dados da Petrobras e foi utilizado o *software* STAT::FIT, versão 2.1. Esse *software* realiza diversos testes estatísticos, como por exemplo testes Chi Quadrado e Kolmogorov-Smirnov (BATEMAN *et al.*, 2013) e apresenta as distribuições que melhor representam os dados inseridos. Além de apresentar a melhor distribuição, o *software*, que é um *add-in* do simulador PROMODEL, ainda apresenta os parâmetros da distribuição e sua equação para ser inserida no modelo de simulação desenvolvido.

A Figura 10, ilustrada a seguir, apresenta para uma das atividades o histograma dos dados de duração multiplicados por um fator constante (para manter a proporcionalidade e preservar sua confidencialidade), bem como a curva da distribuição Gama que melhor representa a duração das atividades. Creemers *et al.* (2015) e Silva *et al.* (2011) também utilizam a distribuição Gama para representar a duração de atividades.

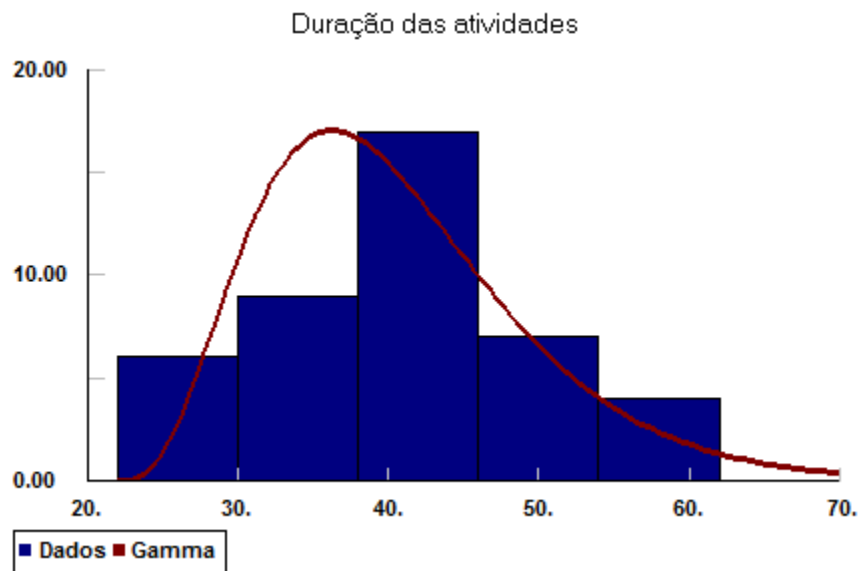


Figura 10: Histograma da duração das atividades e distribuição Gama.

Na Figura 11, apresentada a seguir, é ilustrado a classificação das diferentes distribuições para os dados utilizados no STAT::FIT, que estão representados no gráfico da Figura 10. A distribuição que apresenta melhor classificação é a distribuição Gama. As distribuições Log-logística, Beta, Pearson, Weibull, Log-normal e Rayleigh também não foram rejeitadas nos testes estatísticos. As demais distribuições, segundo os testes realizados, não representam os dados no modelo de simulação.

distribution	rank	acceptance
Gamma[4., 3.19, 15.]	91.3	do not reject
LogLogistic[4., 2.95, 41.9]	56.5	do not reject
Beta[4., 1.92e+003, 2.78, 107]	26.7	do not reject
Pearson 6[4., 76.2, 4.63, 8.28]	14.1	do not reject
Weibull[4., 1.87, 54.2]	10.2	do not reject
Lognormal[4., 3.7, 0.616]	1.59	do not reject
Rayleigh[4., 39.]	0.968	do not reject
Erlang[4., 3., 15.]	0.253	reject
Inverse Gaussian[4., 101, 47.8]	3.87e-003	reject
Pareto[4., 0.413]	0.	reject
Exponential[4., 47.8]	0.	reject
Uniform[4., 178]	0.	reject
Pearson 5[4., 2.39, 77.4]	0.	reject
Power Function[4., 187, 0.665]	0.	reject
Triangular[3., 179, 26.4]	0.	reject
Inverse Weibull[4., 1.37, 3.42e-002]	0.	reject
Chi Squared[4., 41.6]	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 11: Classificação das distribuições.

Para cada nível de conservadorismo, que representa a quantidade de atividades consideradas como pior caso de duração, foram rodadas 500 replicações do modelo de simulação variando a duração das atividades realizadas no Brasil.

O número de replicações foi estimado com base no método apresentado por Harrell et al. (2012), através da equação 6.2, que considera uma das variáveis de decisão do modelo:

$$n = \left( \frac{Z \cdot s}{3} \right)^2 \quad (6.2)$$

Onde, Z é o valor tabelado da distribuição normal, para um determinado intervalo de confiança desejado e s é o desvio padrão da variável. Considerando um nível de confiança de 95% (no qual,  $Z = 1,96$ ) e o desvio padrão obtido através dos dados históricos de tempo de atraso na conclusão dos projetos realizados pelos estaleiros nacionais ( $s = 33,3$ ), chegou-se à conclusão que o número ideal de replicações é de 500.

Cada cenário analisado levou cerca de 15 minutos de esforço computacional. A Tabela 6, apresentada a seguir, mostra os resultados do estudo de simulação. Para cada valor

do parâmetro  $\Gamma$  estudado, são apresentados a média e o desvio-padrão dos projetos concluídos com atraso.

Na medida em que se aumenta o grau de conservadorismo, como era esperado, menos projetos atrasam. Isso acontece pois, de acordo com a abordagem robusta utilizada, quanto maior o grau de conservadorismo considerado no modelo, mais durações de atividades são consideradas como aderentes ao pior caso e, portanto, a programação proposta já considera possíveis atrasos e antecipa a execução das atividades.

Tabela 6: Resultados computacionais da simulação.

<b>Percentil</b>	<b>Grau de conservadorismo</b>	<b>Projetos em atraso (média)</b>	<b>Projetos em atraso (desvio-padrão)</b>
1%	37	48,70	7,42
10%	43	43,20	5,34
20%	45	39,29	4,12
30%	47	34,59	3,85
40%	49	28,70	3,34
50%	50	24,52	2,62
60%	52	20,39	2,06
70%	53	15,49	1,82
80%	55	9,37	1,68
90%	58	4,95	1,14
99%	64	1,18	0,32

Cada um dos projetos, que não foram concluídos no prazo estabelecido, apresentados na Tabela 6 atrasaram, em média, 11,48 meses.

#### 6.4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS CONSOLIDADOS

Para comparar o resultado de atividades alocadas fora do país e projetos com prazo final atrasado em cada nível de conservadorismo  $\Gamma$  considerado no estudo de otimização e simulação, os dois resultados devem ser considerados na mesma grandeza. Para isso, foi calculado o valor financeiro esperado da multa a ser aplicada e uma estimativa do custo do atraso dos projetos.

Como custo para a multa a ser aplicada nas atividades alocadas no exterior, foi considerado um valor médio de multas, baseada no valor total dos projetos na carteira. Esse



valor de multa foi calculado considerando o valor total de investimento do projeto dividido entre as atividades de forma proporcional à sua duração, em dias.

Para o custo de atraso dos projetos foi considerado o valor do óleo não produzido, associado a cada projeto de plataforma do tipo FPSO. O custo de oportunidade, para cada projeto atrasado, é calculado através da variação do Valor Presente Líquido (VPL) da produção atrasada, de acordo com a equação 6.3.

Com o atraso na produção, a receita que deveria ser gerada pelo óleo no instante  $t$ , será gerada no instante  $t+d$ , onde  $d$  é o tempo de atraso do projeto. A equação 6.3 busca quantificar o custo de oportunidade (valor do dinheiro no tempo) referente a esse atraso:

$$CA = \sum_{t=1}^A \frac{Q \cdot P}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^A \frac{Q \cdot P}{(1+i)^{t+d}} \quad (6.3)$$

na qual:

$CA$  = custo do atraso na produção de óleo;

$A$  = atraso médio (em meses);

$i$  = taxa de desconto mensal;

$Q$  = quantidade mensal de produção de óleo do projeto (em barris por mês);

$P$  = preço de um barril de petróleo.

Devido à dificuldade em obtenção dos dados detalhados de cada um dos projetos, foi considerada uma quantidade média  $Q$  de produção de óleo por projeto. As informações foram obtidas nas bases de dados internas da Petrobras. Por se tratar de dados sigilosos, os valores foram distorcidos. Para isso, os valores foram multiplicados por uma constante, de forma a manter a proporcionalidade entre eles. Dessa forma, os custos são apresentados em uma moeda fictícia (Unidades Monetárias – U.M.). O valor do atraso  $d$  na duração dos projetos foi obtido, projeto a projeto, através do modelo de simulação.

Na Tabela 7, são apresentados os valores financeiros (em milhões de U.M.) de valor da multa e custo de atraso nos projetos para cada nível de conservadorismo estudado, bem como o valor total.

Tabela 7: Resultados financeiros.

<b>Percentil</b>	<b>Grau de conservadorismo</b>	<b>Valor da multa (mil U.M.)</b>	<b>Custo do atraso (mil U.M.)</b>	<b>Valor total (mil U.M.)</b>
1%	37	3.362,50	19.931,03	23.293,52
10%	43	5.380,00	17.897,25	23.277,25
20%	45	7.397,50	16.270,22	23.667,72
30%	47	8.742,50	14.236,45	22.978,95
40%	49	10.760,00	11.795,91	22.555,91
50%	50	12.105,00	10.168,89	22.273,89
60%	52	13.450,00	8.541,87	21.991,86
70%	53	14.795,00	6.508,09	21.303,09
80%	55	16.140,00	4.067,56	20.207,56
90%	58	16.812,50	2.033,78	18.846,28
99%	64	17.485,00	406,75	17.891,76

Na Figura 12, apresentada a seguir, é ilustrado o gráfico do custo da multa, em milhões de U.M., para cada nível de conservadorismo considerado no estudo. Como é possível observar, o valor da multa cresce à medida em que aumenta o nível de conservadorismo.

Além disso, é possível observar, na Figura 12, a evolução do custo de oportunidade para os atrasos dos projetos. À medida em que aumenta o nível de conservadorismo, menor é o custo de oportunidade associado ao atraso nos projetos.

O custo total, também apresentado na Figura 12, reduz à medida em que se aumenta o grau de conservadorismo.

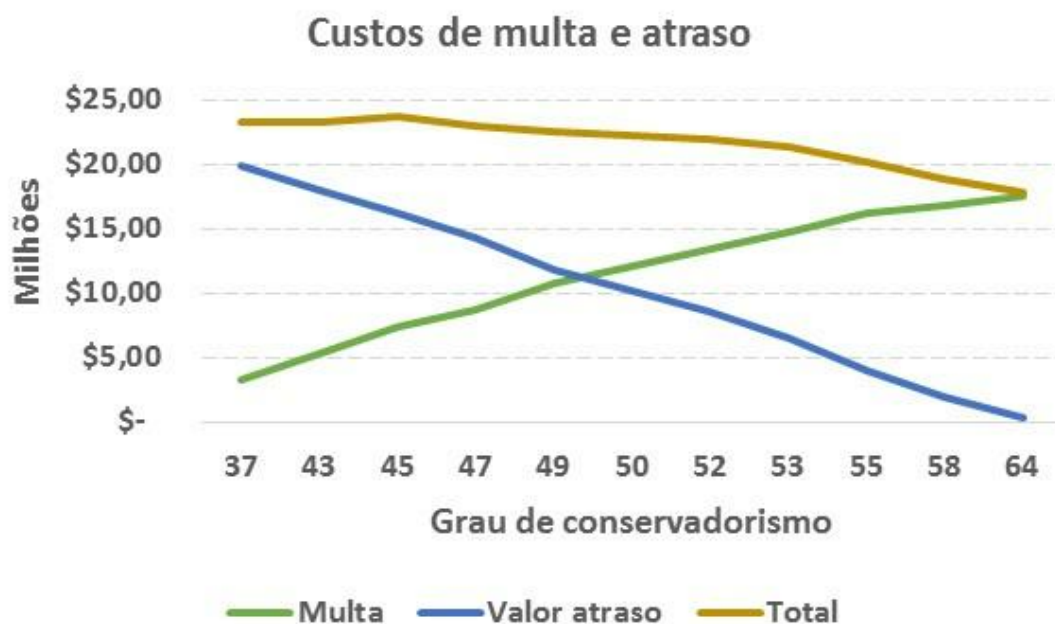


Figura 12: valores financeiros para cada nível de conservadorismo.

À medida em que aumenta o nível de conservadorismo, maior a quantidade de atividades consideradas com atraso; dessa forma, para atender aos prazos estabelecidos para cada um dos projetos e considerando a mesma quantidade de recursos disponíveis no Brasil, mais atividades devem ser realizadas no exterior. Isso se deve à restrição de capacidade dos recursos nacionais.

Desde 2014, quando o estudo em relação à programação de projetos de construção naval com restrições de cláusulas de conteúdo nacional foi iniciado na indústria petrolífera brasileira, é preponderante entre os profissionais que atuam nestas atividades a afirmação de que o custo associado ao atraso na conclusão dos projetos (custo de oportunidade do atraso na produção de óleo) é muito maior que o custo das multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo local. Com essa premissa, a decisão de alocar atividades no exterior, buscando o prazo, mesmo que com isso sejam aplicadas multas por não cumprimento de exigências legais de conteúdo nacional, é tida como a melhor decisão.

Entretanto, desde 2014 a cotação do barril do *Brent*, preço de referência internacional para o petróleo, caiu de patamares próximos de 110 dólares para valores próximos a 50 dólares; o que representa uma queda de mais de 50%. Com essa redução, o custo de

oportunidade relacionado ao atraso na produção de petróleo também reduziu, chegando, em alguns cenários, a patamares comparáveis com os custos das multas, como é possível observar na Figura 12. Porém, como é possível observar na Tabela 5, programações considerando maior grau de conservadorismo, alocando atividades no exterior para reduzir atraso na conclusão dos projetos, ainda levam a decisões com custos menores.

Atualmente, a decisão quanto à programação e à alocação de atividades de construção de navios, sondas e plataformas do tipo FPSO nos estaleiros nacionais é realizada com base em uma análise estática, através de uma planilha de Excel. Essa decisão é realizada sem o auxílio de ferramentas de apoio à tomada de decisão.

Ao programar os projetos para os próximos 15 anos, em uma análise de longo prazo, utilizando o método de decisão proposto nesta pesquisa e considerando o cenário determinístico, são alocadas três atividades em estaleiros no exterior. Para essa análise, foram consideradas as durações planejadas para as atividades, sem levar em conta os possíveis atrasos. Em um estudo similar, considerando uma análise estática em planilha de Excel, pelo menos seis atividades seriam alocadas em recursos de outros países. Ou seja, a aplicação da ferramenta proposta nesse estudo, considerando o cenário determinístico, reduz para metade as atividades alocadas no exterior. Isso é possível devido à melhor utilização dos recursos nacionais.

Dessa forma, o modelo proposto neste trabalho trouxe ganhos no processo decisório de programação de atividades para construção de navios, sondas e plataformas do tipo FPSO em estaleiros, reduzindo a exposição a multas por não atendimento das cláusulas de conteúdo local.

Como atualmente não existe nenhum estudo considerando incerteza na duração das atividades no processo de programação dos projetos, não é possível comparar o resultado da otimização robusta, para diferentes cenários, com a decisão como é tomada atualmente.

O modelo desenvolvido neste trabalho apresentou-se adequado para o problema estudado e trouxe bons resultados, reduzindo exposição às multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional. Além disso, com o estudo proposto foi possível trazer previsibilidade em relação aos possíveis atrasos na produção de petróleo, bem como os custos associados a esse atraso.

## 6.5 ANÁLISE DE MÉDIO PRAZO

Além do estudo apresentado anteriormente, o mesmo modelo foi aplicado em uma análise de médio prazo, com análise de sensibilidade na disponibilidade de recursos. Nesta análise, foram considerados projetos com prazo de conclusão dentro dos próximos cinco anos. Além disso, a oferta de estaleiros nacionais foi reduzida, de acordo com análise da saúde financeira dessas empresas.

Com a redução de projetos, considerando o horizonte de cinco anos, os parâmetros de nível de conservadorismo foram redefinidos. De forma análoga ao estudo de longo prazo, para cada uma das 67 atividades pertencentes aos projetos considerados nesta análise foi atribuída uma distribuição de Bernoulli com a probabilidade de se estar no pior caso. Para isso, foram analisados os dados históricos e definiu-se como pior caso os seis meses anteriores à duração mais longa de determinada atividade. Dessa forma, definiu-se que a probabilidade de se estar no pior caso de duração para cada atividade é de 30%.

Para definição dos recursos a serem considerados neste estudo, foi utilizado como referência o *Credit Rating Serasa*. Segundo a Serasa Experian, o *Credit Rating Serasa* é um indicador que representa uma análise financeira de empresas, considerando demonstrativos contábeis que tem como objetivo realizar uma avaliação do risco de crédito.

O *Credit Rating Serasa* é uma escala que vai de 1 a 22. Quanto maior a classificação de uma empresa, pior é sua situação financeira. Empresas que possuem essa avaliação maior ou igual a 20 foram consideradas com alto risco financeiro e, portanto, foram retiradas desta análise de médio prazo. Dessa forma, neste cenário foram consideradas 2 vagas de dique-seco e 7 vagas de cais disponíveis para a alocação das atividades dos projetos.

Os resultados do modelo de otimização desta análise de médio prazo, além do grau de conservadorismo utilizado em cada cenário, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados computacionais da otimização – análise de médio prazo.

<b>Percentil</b>	<b>Grau de conservadorismo</b>	<b>Atividades alocadas no exterior</b>	<b>Aderência (%)</b>
1%	12	15	97,44
10%	15	17	96,15
20%	17	18	95,51
30%	18	20	94,23
40%	19	21	93,59
50%	20	22	92,95
60%	21	23	92,31
70%	22	24	91,67
80%	23	26	90,38
90%	25	27	89,74
99%	29	30	87,82

Na Tabela 8, pode-se observar, para cada grau de conservadorismo considerado, a quantidade de atividades alocadas no exterior e a aderência em relação à solução determinística. A aderência calculada é a razão entre a solução ótima do cenário determinístico, considerando a duração das atividades conforme dados de planejamento (neste cenário, foram 13 atividades alocadas no exterior), e a solução para cada um dos cenários estudados, conforme apresentado anteriormente na equação 5.1. Observa-se que, à medida em que o grau de conservadorismo aumenta, mais atividades são alocadas em recursos no exterior, aumentando, portanto, a exposição a multas por não atendimento às cláusulas de conteúdo nacional.

Com os resultados da otimização para o cenário de médio prazo, foi analisado o modelo de simulação para verificar a quantidade de projetos concluídos fora do prazo estabelecido para cada cenário de nível de conservadorismo.

De forma análoga ao estudo de longo prazo, foi considerada distribuição Gama para a duração das atividades. O resultado do modelo de simulação é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados computacionais da simulação – análise de médio prazo.

<b>Percentil</b>	<b>Grau de conservadorismo</b>	<b>Projetos em atraso (média)</b>	<b>Projetos em atraso (desvio-padrão)</b>
1%	12	34,83	4,78
10%	15	32,95	3,76
20%	17	28,40	2,88
30%	18	25,12	2,69
40%	19	22,09	2,85
50%	20	18,28	2,30
60%	21	14,41	1,44
70%	22	11,93	1,28
80%	23	7,72	1,19
90%	25	4,23	0,93
99%	29	1,08	0,29

Assim como o resultado na análise de longo prazo, na medida em que se aumenta o grau de conservadorismo, mais projetos atendem o prazo estabelecido de construções das plataformas. A redução de projetos em atraso reduz o custo de oportunidade associado ao atraso na produção de óleo.

Na Tabela 10, é possível analisar a evolução dos valores de multa e custos dos atrasos, bem como o custo total, à medida em que se aumenta o grau de conservadorismo para o estudo de médio prazo realizado.

Tabela 10: Resultados financeiros.

<b>Percentil</b>	<b>Grau de conservadorismo</b>	<b>Valor da multa (mil U.M.)</b>	<b>Custo do atraso (mil U.M.)</b>	<b>Valor total (mil U.M.)</b>
1%	12	10.087,50	14.167,29	24.254,80
10%	15	11.432,50	13.402,60	24.835,10
20%	17	12.105,00	11.551,86	23.656,86
30%	18	13.450,00	10.217,70	23.667,70
40%	19	14.122,50	8.985,23	23.107,73
50%	20	14.795,00	7.435,49	22.230,49
60%	21	15.467,50	5.861,35	21.328,85
70%	22	16.140,00	4.852,60	20.992,59
80%	23	17.485,00	3.140,15	20.625,15
90%	25	18.157,50	1.720,58	19.878,08
99%	29	20.175,00	439,30	20.614,30

A Figura 13, apresentada a seguir, ilustra o balanço financeiro entre o valor esperado de multa por não atendimento das cláusulas de conteúdo nacional e o custo de oportunidade relacionado ao atraso na produção de petróleo. Além disso, também é possível observar na Figura 13 a evolução do custo total, que diminui em cenários com maior grau de conservadorismo.

Analogamente à Figura 12, os números foram distorcidos para manter a confidencialidade das informações. Foi utilizado um mesmo fator de distorção para manter a proporcionalidade das informações em todos os cenários estudados.

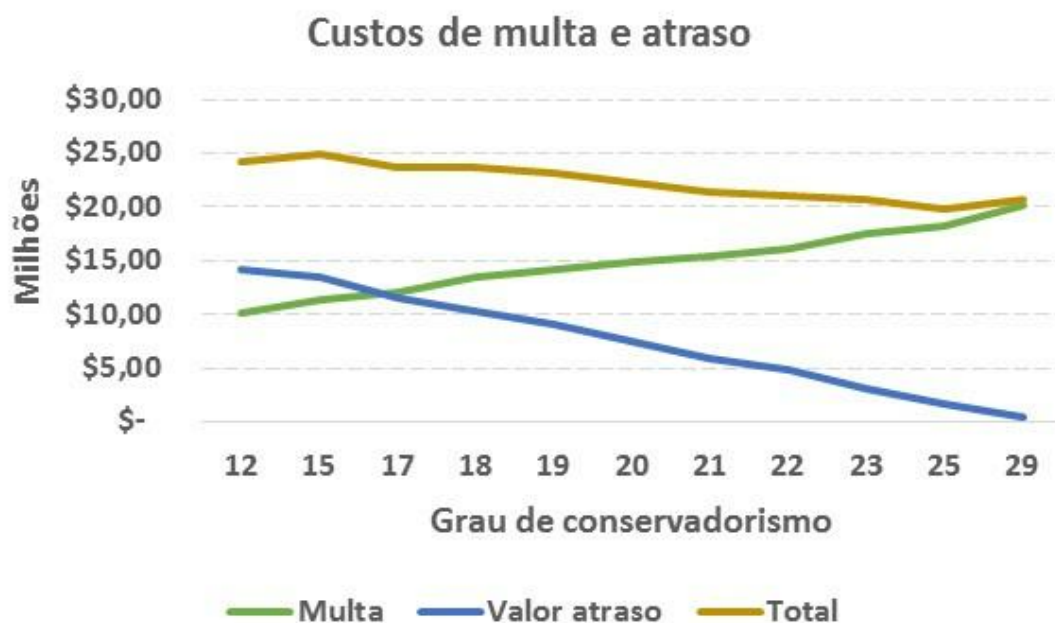


Figura 13: valores financeiros para cada nível de conservadorismo – análise de médio prazo.

Na Figura 13, é possível observar que quanto maior o nível de conservadorismo, maior o custo de multa por não atendimento às cláusulas de conteúdo nacional. Por outro lado, quando se aumenta o nível de conservadorismo, o custo de oportunidade referente ao atraso na conclusão dos projetos reduz. Entretanto, diferente da análise de longo prazo, é possível observar na Tabela 8 que a decisão com grau de conservadorismo de 25 (percentil 90) é menor que a decisão com grau de conservadorismo de 29 (percentil 99). Dessa forma, conclui-se que, neste cenário de médio prazo, uma decisão considerando um grau de



conservadorismo de 25, ou seja, não considerando um percentil maior (mais conservador) de atividades com maior atraso, oferece um custo total menor. Isso significa que, analisando os valores de multa e atraso na produção de óleo, no cenário de médio prazo existe um cenário com menor no custo no qual o decisor assume um risco de atraso na entrega dos projetos.

Ao analisar a carteira de projetos de navios, sondas e plataformas do tipo FPSO, percebe-se que há uma concentração de projetos nos próximos cinco anos; principalmente projetos associados à produção de óleo na camada do Pré-sal. Com a redução na disponibilidade de recursos de estaleiros, na análise de médio prazo, mais atividades são alocadas no exterior. Isso faz com que o custo relacionado às multas por não atendimento de cláusulas de conteúdo nacional seja maior. Por outro lado, como não são considerados atrasos nos projetos realizados no exterior, com o aumento de atividades sendo realizadas em estaleiros de outros países, existe uma redução na quantidade total de projetos atrasados. Portanto, o custo de oportunidade do atraso na produção de óleo das plataformas é menor na análise de curto prazo.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta pesquisa, foi proposta uma abordagem matemática para o problema de programação de atividades em estaleiros com foco no atendimento às cláusulas de conteúdo nacional. Foi proposto um modelo de otimização de programação inteira mista, baseado em modelos clássicos de *resource-constrained project scheduling problem* (RCPSP) e considerando possíveis atrasos na duração das atividades através de uma abordagem robusta baseada em Bertsimas e Sim (2004). Foram considerados os projetos de construção de navios, sondas de exploração e plataformas de produção e óleo, bem como os recursos: dique-seco e vagas de cais disponíveis nos estaleiros nacionais. O objetivo do modelo foi verificar se os recursos são capazes de atender à demanda, respeitando o prazo final dos projetos e minimizando os projetos realizados em recursos estrangeiros.

Foi proposto também um modelo de simulação de eventos discretos para avaliar a solução proposta pelo modelo de otimização. Através do estudo de simulação, foi possível verificar o impacto dos atrasos nas atividades no atendimento ao prazo de entrega dos projetos para cada diferente nível de conservadorismo considerado no estudo. Além disso, através do modelo de otimização é possível realizar análises de sensibilidade e avaliar possíveis outras soluções para a problema prático.

As principais decisões associadas ao modelo de otimização são: data de início e fim de cada atividade de todos os projetos analisados; alocação destas atividades às vagas de cais e dique-seco disponíveis no Brasil; indicação de quais atividades devem ser realizadas com recursos estrangeiros, não cumprindo as cláusulas de conteúdo local.

Foram considerados, nesse estudo, os projetos de navios petroleiros, sondas e plataformas do tipo FPSO que estão sendo construídos ou que serão construídos no Brasil nos próximos anos. Esses projetos estão associados ao plano de exploração e produção de óleo e gás no país, principalmente projetos de produção na camada do pré-sal; além de projetos associados à demanda por capacidade de movimentação de óleo, gás e derivados.

O modelo proposto foi aplicado, considerando uma visão de longo prazo, na qual foram analisados projetos dentro de um horizonte de planejamento de quinze anos. Além disso, o estudo também foi aplicado em uma visão de médio prazo, considerando horizonte de cinco anos, no qual foi feita uma análise de cenário, reduzindo a disponibilidade de

recursos. Essa redução da disponibilidade dos recursos foi realizada através de uma análise da saúde financeira das empresas. Em ambos os casos, a aplicação do modelo trouxe resultados úteis ao processo de decisão.

Atualmente, essas decisões são tomadas através do simples empilhamento da demanda por vagas de cais e dique-seco, sem análise matemática de melhor aproveitamento dos recursos, visto que existem folgas inseridas nas durações das atividades, dando flexibilidade para programação. Esse tipo de análise é realizado através de uma planilha Excel, através da qual é possível identificar em que período a demanda por recursos de estaleiros é maior que a oferta. Com a aplicação do modelo proposto nesta pesquisa, é possível aproveitar melhor a disponibilidade dos recursos nacionais e minimizar a utilização de recursos estrangeiros para atendimento da demanda brasileira. Com essa minimização, é possível reduzir a exposição à aplicação de multas por não atendimento às cláusulas de conteúdo nacional. Além desse ganho, há também um ganho de valor de imagem e reputação, associado ao atendimento das restrições impostas e melhor uso de recursos nacionais. Esse ganho é difícil de ser medido, mas pode ser bastante significativo.

Por outro lado, atrasos no atendimento às demandas por navios, sondas e plataformas do tipo FPSO também tem elevados custos, associados, principalmente, ao custo de oportunidade do óleo que será produzido com atraso e também custos de imagem e reputação da Petrobras por não cumprimento da curva de óleo proposta em seu Plano de Negócios e Gestão (PNG).

Com a abordagem robusta, foi possível considerar possíveis atrasos na duração das atividades realizadas nos estaleiros nacionais. Ao analisar a base de dados referente ao histórico de projetos, percebeu-se que esses atrasos são bastante comuns. A modelagem robusta é uma forma de propor uma programação proativa, na qual decisões referentes à possíveis atrasos são antecipadas. Ao contrário de uma abordagem reativa, na qual decisões corretivas são tomadas após a confirmação dos atrasos, a abordagem proativa traz melhores resultados.

Uma contribuição desta pesquisa é o método proposto para definição do parâmetro que mede o nível de conservadorismo da modelagem robusta. Na grande maioria dos artigos estudados, o nível de conservadorismo é definido de forma arbitrária, sem nenhuma interpretação associada ao problema. Neste trabalho, o nível de conservadorismo, que

representa o número de atividades consideradas como o pior caso de duração, foi modelado através de uma distribuição binomial. Essa distribuição representa o somatório de  $n$  distribuições de Bernoulli, onde  $n$  é o número total de atividades consideradas no modelo. Cada uma dessas distribuições representa a probabilidade de a atividade estar no pior caso de duração. Dessa forma, o parâmetro de nível de conservadorismo utilizado nos diferentes cenários analisados com o modelo proposto está associado à probabilidade de até  $m$  atividades estarem no pior caso.

Além disso, outra contribuição foi a elaboração de um modelo de simulação de eventos discretos para realizar análises de sensibilidade para o problema de programação de projetos, foco deste estudo. Mesmo considerando os resultados do estudo proposto, que buscou uso mais eficiente dos recursos nacionais, algumas atividades devem ser realizadas em recursos estrangeiros, o que leva a uma exposição a multas. Isso se deve à restrição de capacidade dos recursos nacionais, bem como às ineficiências, associadas aos atrasos que foram considerados no estudo proposto.

Analisando os resultados apresentados pelo modelo proposto, nota-se a dificuldade em cumprir todas as exigências de conteúdo nacional em projetos direcionados à indústria naval. Isso se deve, principalmente, à restrição de capacidade relacionada à limitação de vagas de dique-seco e cais disponíveis no país. A expansão da indústria naval brasileira, desde a sua retomada no início dos anos 2000, não acompanhou o crescimento de projetos de navios, sondas e plataformas, principalmente associadas à expansão da exploração e produção de óleo na camada do pré-sal. Além disso, essa dificuldade também está associada a questões de produtividade, representadas neste estudo pelo atraso na realização das atividades de construção, conversão e integração das plataformas do tipo FPSO.

Investimentos em expansão de capacidade e em pesquisa e desenvolvimento, visando melhorias tecnológicas podem ser a solução para melhorar a produtividade da indústria naval brasileira. Por outro lado, ainda existem fatores que inibem os investimentos de longo prazo no crescimento da indústria naval brasileira, como a incerteza em relação à sustentação do crescimento da demanda. Por se tratar de altos valores investidos, é necessário que projetos de exploração e produção ao longo de vários anos sejam realizados para que se tenha demanda suficiente na indústria naval para que o retorno do investimento ocorra.

Na análise realizada, foi proposto um balanço entre o valor de multa a ser aplicado e o custo do atraso no início da produção de óleo, associado ao atraso na conclusão das construções das plataformas. Entretanto, outros fatores, de difícil mensuração, também devem ser considerados, como consequências do risco de imagem associado ao não cumprimento da produção de óleo planejada no Plano de Negócios e Gestão da companhia, em função de atrasos dos estaleiros nacionais; e o impacto negativo na imagem e reputação ao não atender exigências legais e pagar multas.

A abordagem proposta nesta pesquisa pode ser aplicada em outros problemas de programação de projetos com restrição de recursos, principalmente na área de óleo e gás. Um exemplo de aplicação deste estudo é na programação de sondas de perfuração em projetos de exploração e produção. Além disso, outros métodos podem ser propostos neste problema para considerar possíveis atrasos e incertezas na duração das atividades, como, por exemplo, otimização estocástica ou programação dinâmica. Outro estudo futuro proposto é um processamento anterior ao modelo de otimização apresentado para definição de quais atividades devem ser consideradas como pior caso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, B., SHADROKH, S., ARKAT, J. “Bi-objective resource constrained project scheduling with robustness and makespan criteria”, **Applied Mathematics and Computation** v. 180, pp. 146-152, 2006.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em 19 de fevereiro de 2015.
- ARTIGUES, C., LEUS, R., NOBIBON, F. “Robust optimization for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations”, **Flexible Services and Manufacturing Journal** v. 25, pp. 175-205, 2013.
- BASSI, H., FERREIRA, V., BAHIANSE, L. “Planning and scheduling a fleet of rigs using simulation-optimization”, **Computers & Industrial Engineering** v. 63, pp. 1074-1088, 2012.
- BATEMAN, R. *et al.* **Simulação de sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- BERTSIMAS, D., SIM, M. “The price of robustness”, **Operations Research** v. 52, pp. 35-53, 2004.
- BESIKCI, U., BILGE, U., ULUSOY, G. “Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem”, **European Journal of Operational Research** v. 240, pp. 22-31, 2015.
- BIANCO, L., DELLOLMO, P., SPERANZA, M. “Heuristics for multimode scheduling problems with dedicated resources”, **European Journal of Operational Research** v. 107, pp. 260-271, 1998.
- BLAZEWICZ, J., LENSTRA, J., KAN, A. “Scheduling subject to resource constraints: classifications and complexity”, **Discrete Applied Mathematics** v. 5, pp. 11-24, 1983.
- BRUCKER, P. *et al.* “A branch and bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem”, **European Journal of Operational Research** v. 107, pp. 272-288, 1998.
- BRUCKER, P. *et al.*, “Resource constrained project scheduling: notation, classification, models and methods”, **European Journal of Operational Research** v. 107, pp. 272-288, 1999.

- BRUNI, M., *et al.*, “A heuristic approach for resource constrained project scheduling with uncertain activity durations”, **Computers and Operations Research** v. 38, pp. 1305-1318, 2011.
- CARVALHO, A., OLIVEIRA, F., SCAVARDA, L. “Tactical capacity planning in a real-world ETO industry case: a robust optimization approach”, **International Journal of Production Economics** v. 167, pp. 187-203, 2016.
- CHAKRABORTTY, R., SARKER, R., ESSAM, D. “Multi-mode resource constrained project scheduling under resource disruptions”, **Computers and Chemical Engineering** v. 88, pp. 13-29, 2016.
- CHENG, J. *et al.*, “Multi-mode resource-constrained project scheduling problems with non-preemptive activity splitting”, **Computers & Operations Research** v. 53, pp. 275-287, 2015.
- CNI. “A indústria e o Brasil: Cadeia produtiva de petróleo e gás – Política de Conteúdo Local”. **Confederação Nacional da Indústria**, 2012. Disponível em: <[http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_13/2012/08/20/44/20120906112614214901e.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_13/2012/08/20/44/20120906112614214901e.pdf)>. Acesso em 30 de julho de 2016.
- CREEMERS S., REYCK, B., LEUS, R. “Project planning with alternative Technologies in uncertain environments”, **European Journal of Operational Research** v. 242, pp. 465-476, 2015.
- DINSMORE, P., SILVEIRA, F. **Gerenciamento de projetos: como gerenciar seus projetos com qualidade, dentro do prazo e custos previstos**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.
- FAWZAN, A., HAOUARI, M. “A bi-objective model for robust resource constrained project scheduling”, **International Journal of Production Economics** v. 96, pp. 175-187, 2005.
- FOSTER, M. *et al.* **Retomada da indústria naval e offshore do Brasil**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro SA, 2013.
- FULGA, C. “Portfolio optimization with disutility-based risk measure”, **European Journal of Operational Research** v. 251, pp. 541-553, 2016.
- FURIAN, N. *et al.* “A conceptual modeling framework for discrete event simulation using hierarchical control structures”, **Simulation Modelling Practice and Theory** v. 56, pp. 82-96, 2015.

- GAREY, M., JOHNSON, D., STOCKMEYER, L. "Some simplified NP-Complete graph problems", **Theoretical Computer Science** v.3, pp. 237-267, 1976.
- GINZBURG, D., GONIK, A. "A heuristic for network project scheduling with random activity durations depending on the resource allocation", **International Journal of Production Economics** v. 55, pp. 149-162, 1998.
- GINZBURG, D., GONIK, A., LASLO, Z. "Resource constrained scheduling simulation model for alternative stochastic network projects", **Mathematics and Computers in Simulation** v. 63, pp. 105-117, 2003.
- HAASE, K., LATTEIER, J., SCHIRMER, A. "The course scheduling problem at Lufthansa Technical Training", **European Journal of Operational Research** v. 110, pp. 441-456, 1998.
- HARREL, C., GHOSH, B., BOWDEN, R. **Simulation using Promodel**. 3<sup>rd</sup>. edition. New York: McGraw-Hill, 2012.
- HARTMANN, S., BRISKORN, D. "A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem", **European Journal of Operational Research** v. 207, pp. 1-14, 2010.
- HERROELEN, W., LEUS, R. "Project scheduling under uncertainty: survey and research potentials", **European Journal of Operational Research** v. 165, pp. 289-306, 2005.
- KELLENBRINK, C., HELBER, S. "Scheduling resource-constrained projects with a flexible project structure", **European Journal of Operational Research** v. 246, pp. 379-391, 2015.
- KLEIN, R., SCHOLL, A. "PROGRESS: Optimally solving the generalized resource-constrained project scheduling problem", **Mathematical Methods of Operations Research** v. 52, pp. 467-488, 2000.
- KNYAZEVA, M., BOZHENYUK, A., ROZENBERG, I. "Resource-constrained project scheduling approach under fuzzy conditions", **Computer Science** v. 77, pp. 56-64, 2015.
- KONÉ, O. *et al.*, "Event-based MILP models for resource constrained project scheduling problems", **Computers & Operations Research** v. 38, pp. 3-13, 2011.
- KONÉ, O. *et al.*, "Comparison of mixed integer linear programming models for the resource-constrained project scheduling problem with consumption and production of resources", **Flexible Services and Manufacturing Journal** v. 25, pp. 25-47, 2012.



- KOPANOS, G., KYRIAKIDIS, T., TSIONI, G. “New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems”, **Computers and Chemical Engineering** v. 68, pp. 96-106, 2014.
- KRETER, S., RIECK, J., ZIMMERMANN, J. “Models and solution procedures for the resource-constrained project scheduling problem with general temporal constraints and calendars”, **European Journal of Operational Research** v. 251, pp. 387-403, 2016.
- KWON, B., LEE, G. “Spatial scheduling for large assembly blocks in shipbuilding”, **Computers & Industrial Engineering** v. 89, pp. 203-212, 2015.
- KYRIAKIDIS T., KOPANOS, G., TSIONI, G. “MILP formulation for resource-constrained project scheduling problem”, **Computers and Chemical Engineering** v.36, pp. 369-385, 2011.
- LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projetos de experimentos simulados**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.
- LI, H., WOMER, N. “Solving stochastic resource-constrained project scheduling problems by closed-loop approximate dynamic programming”, **European Journal of Operational Research** v. 246, pp. 20-33, 2015.
- LIMA, J., LOBATO, K., LEAL, F. “Aplicação do IDEF-SIM na modelagem conceitual de processos de seleção de resíduos sólidos urbanos”. **Em Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, pp. 2904-2913, Ubatuba, São Paulo, 2011.
- LIN, X., JANAK, S., FLOUDAS, C. “A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty: bounded uncertainty”, **Computers and Chemical Engineering** v. 28, pp. 1069-1085, 2004.
- MASMOUDI, M., HAIT, A. “Project scheduling under uncertainty using fuzzy modelling and solving techniques”, **Engineering Applications of Artificial Intelligence** v. 26, pp. 135-149, 2013.
- MEYER, P. **Probabilidade: aplicações à estatística**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.
- MOHAGHAR, A. *et al.* “Optimal delays, safe floats, or release dates. Applications of simulation optimization in stochastic project scheduling”, **Economics and Finance** v. 39, pp. 469-475, 2016.

- MONTEVECHI, J. *et al.* “Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company”. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, pp. 1624-1635, Baltimore 2010.
- NABER, A., KOLISCH, R. “MIP models for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles”, **European Journal of Operational Research** v. 239, pp. 335-348, 2014.
- NGOASONG, M. “How international oil and gas companies respond to local content policies in petroleum producing developing countries: a narrative enquiry”, **Energy Policy** v. 73, pp. 471-479, 2014.
- PARASKEVOPOULOS, D., TARANTILIS, C., IOANNOU, G. “Solving project scheduling problems with resource constraints via an event list-based evolutionary algorithm”, **Expert Systems with Applications** v. 39, pp. 3983-3994, 2012.
- PARK, K., HAM, S., LEE, C. “Application and validation of production planning simulation in shipbuilding”, **Ocean Engineering** v. 114, pp. 154-167, 2016.
- PEREZ, M., KUHL, M. “Simulation-based optimization approach for stochastic resource constrained project management”. In: **Proceedings of Industrial and systems engineering research conference**, pp. 3316-3324, Montreal, Canada, 2014.
- PINHO, A., MORAIS, N. “Utilização da simulação computacional combinada à técnica de otimização em um processo produtivo”, **Revista P&D em Engenharia de Produção** v. 08, pp. 88-101, 2010.
- PRIETO, D. **A política de conteúdo local e as decisões de investimento no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2014.
- RAMOS, A., GODIM, C. “Mudar é preciso: revisitando o conteúdo local para a indústria de óleo e gás”. **PWC**, 2015. Disponível em < [www.strategyand.pwc.com/reports/mudar-e-preciso](http://www.strategyand.pwc.com/reports/mudar-e-preciso)>. Acesso em 30 de julho de 2016.
- RANJBAR, M., HOSSEINABADI, S., ABASIAN, F. “Minimizing total weighted late work in the resource constrained project scheduling problem”, **Applied Mathematical Modelling** v. 37, pp. 9776-9785, 2013.
- SERASA EXPERIAN. Disponível em <<https://www.serasaexperian.com.br/consultas/risco-credito/>>. Acesso em 11 de maio de 2016.

SILVA, A., OCHI, L. “Heurísticas evolutivas híbridas para o problema de escalonamento de projetos com restrição de recursos dinâmicos” In: Lopes, H.S., Takahashi, R.H.C. (eds), *Computação evolucionária em problemas de engenharia*, capítulo 13, Omnipax, Curitiba, Brasil, 2011.

SILVA, V.*et al.* “Uma avaliação da distribuição de atividades estática e dinâmica em ambientes paralelos usando o Hydra”. Em **Anais do XXXI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**, pp. 102-109 Natal, Rio Grande do Norte, 2011.

SINAVAL. Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e *Offshore*. Disponível em <<http://sinaval.org.br/>>. Acesso em 26 de fevereiro de 2015.

TABRIZI, B., GHADERI, S. “A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement”, **Computers & Industrial Engineering** v. 98, pp, 11-29, 2016.

TSAI, Y., GEMMILL, D. “Using tabu search to schedule activities of stochastic resource constrained projects, **European Journal of Operational Research** v. 111, pp. 129-141, 1998.

VASCONCELLOS, R. **Um algoritmo genético para o problema de *scheduling* de projetos com restrição de recursos – uma solução com gerenciamento de risco**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

VONDER, S., DEMEULEMEESTER, E., HERROELEN, W. “Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: an experimental analysis”, **European Journal of Operational Research** v. 189, pp. 723-733, 2008.

WOLSEY, L. **Integer Programming**. 4 ed. Wiley: Interscience series in discrete mathematics and optimization, 1998.

YAMASHITA, D., MORABITO, R. “Um algoritmo branch-and-bound para o problema de programação de projetos com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos”, **Gestão e Produção** v. 14, pp. 545-555, 2007.

ZHENG, X, WANG, L. “A multi-agent optimization algorithm for resource constrained project scheduling problem”, **Expert Systems and Applications** v. 42, pp. 6039-6049, 2015